



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL – APROVECHAMIENTOS HIDRÁULICOS

**MODELACIÓN HIDRÁULICA DE REACTORES DE ELECTROCOAGULACIÓN
CON FLUJO VERTICAL BIFÁSICO**

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
DOCTOR EN INGENIERÍA

PRESENTA:
M. EN I. JAVIER DE JESÚS CANTO RÍOS

TUTOR PRINCIPAL
DR. VÍCTOR HUGO ALCOCER YAMANAKA, CONAGUA
COMITÉ TUTOR
DR. CARLOS AGUSTÍN ESCALANTE SANDOVAL, FACULTAD DE INGENIERIA
DR. OSCAR FUENTES MARILES, INSTITUTO DE INGENIERIA
DR. GABRIEL ECHÁVEZ ALDAPE, FACULTAD DE INGENIERIA
DRA. ALEJANDRA MARTÍN DOMINGUEZ, IMTA

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD MX, NOVIEMBRE 2018



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: DR. GABRIEL ECHÁVEZ ALDAPE

SECRETARIO: DR. OSCAR FUENTES MARILES

VOCAL: DR. VÍCTOR HUGO ALCOCER YAMANAKA

1 ER. SUPLENTE: DR. CARLOS AGUSTÍN ESCALANTE SANDOVAL

2 D O. SUPLENTE: DRA.ALEJANDRA MARTÍN DOMINGUEZ

LUGAR O LUGARES DONDE SE REALIZÓ LA TESIS: INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA, CAMPUS UNAM.

TUTOR DE TESIS:

VÍCTOR HUGO ALCOCER YAMANAKA

FIRMA

AGRADECIMIENTOS

A mis padres por el apoyo y consejos que guiaron mi camino durante la realización de este trabajo de investigación.

A mis amigos por brindarme su amistad, apoyo, valiosas aportaciones y comentarios en el desarrollo del este trabajo.

A mis directores de Tesis, Doctor Víctor Hugo Alcocer Yamanaka y la Doctora Alejandra Martín Domínguez por brindarme su tiempo, las herramientas necesarias y compartir sus conocimientos sin reserva alguna para crecer como profesional, permitirme trabajar con ellos en el desarrollo de este tema de tesis y apoyarme para su conclusión.

Por permitirme realizar los estudios de posgrado y por el apoyo económico recibido durante la realización de estos, agradezco primeramente al Programa de Becas para Posgrado del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), así como al programa de maestría y doctorado de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Así mismo, agradezco al Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) por el uso de sus instalaciones durante los estudios de posgrado.

RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue contribuir al estudio del comportamiento hidráulico de reactores de electrocoagulación que trabajen con flujo pistón vertical mixto y a superficie libre. Se tomaron en cuenta las dos fases presentes durante el proceso electroquímico, comparando la respuesta de modelos matemáticos con las condiciones reales a escala laboratorio.

Se utilizó un reactor a escala laboratorio, construido para facilitar la modificación de sus características geométricas y permitir la evaluación de la separación y número de electrodos en la respuesta del sistema.

Para cada configuración, se consideró que el flujo de entrada se distribuía proporcionalmente a través de los canales formados por los electrodos, resultando la misma velocidad del agua entre cada uno de ellos. Esta condición fue comparada con los resultados arrojados por el programa utilizado para su modelación numérica.

Las variables de respuesta analizadas fueron el voltaje, la concentración de coagulante real, la carga hidráulica, las zonas muertas y el tiempo de residencia hidráulico. Las variables número de placas y número de módulos, resultaron ser significativas para tres de las cinco respuestas, mientras que la separación de placas y la densidad de corriente para las restantes dos respuestas.

En relación con el coagulante real, se obtuvieron eficiencias de concentración mayores al 100%. Por otro lado, el sistema tiene un alto porcentaje de zonas muertas, las cuales aumentan con la presencia de la reacción electroquímica.

La modelación computacional, permitió tener una idea del comportamiento del flujo dentro del sistema debido a la falta de instrumentación adecuada para la medición en laboratorio.

Como resultado del análisis de imágenes, se obtuvo un rango de tamaño de burbuja presente en el reactor durante la reacción electroquímica, sin embargo, es necesario contar con más información relacionada al desgaste de las placas y otros factores inmersos en el flujo durante la electroquímica, para mejorar el resultado.

CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	4
ÍNDICE DE IMÁGENES.....	4
1 INTRODUCCIÓN.....	7
2 ESTADO DEL ARTE.....	11
2.1 Electrocoagulación.....	11
2.1.1 Generalidades.....	11
2.1.2 Clasificación de los reactores.....	12
2.1.3 Parámetros de diseño.....	13
2.2 Técnicas de medición de partículas en flujos multifásicos.....	18
2.2.1 Velocidad de partículas por seguimiento de imágenes (PIV).....	18
2.2.2 Medición de burbujas por estereo microscopios.....	21
2.2.3 Medición de burbujas por películas calientes y fibras ópticas.....	22
3 MARCO TEÓRICO.....	24
3.1 Diseño de experimentos.....	24
3.2 Prueba de trazadores.....	26
3.3 Dinámica de fluidos computacional (CFD).....	28
3.3.1 Metodología general de los CFD's.....	29
3.3.2 Modelo numérico Ansys Fluent®.....	29
3.3.3 Modelación multifase.....	30
4 METODOLOGÍA.....	31
4.1 Introducción.....	31
4.2 Modelo experimental, equipos y materiales.....	32
4.3 Diseño de experimentos.....	36
4.4 Carga hidráulica y calibración eléctrica.....	38
4.5 Evaluación del comportamiento hidráulico del reactor.....	39
4.6 Captura y análisis de imágenes.....	40
4.7 Estimación de la velocidad de flujo.....	41

4.8	ecuación para diseño de reactores	43
4.8.1	Acoplamiento de ecuaciones	43
5	ANÁLISIS DE RESULTADOS	50
5.1	Voltaje del sistema	51
5.1.1	Eficiencia de voltaje	54
5.2	Concentración coagulante	56
5.2.1	Eficiencia en generación de coagulante	59
5.3	Prueba de trazadores.....	60
5.3.1	Tiempo de residencia hidráulico	60
5.3.2	Zonas muertas y cortos circuito	63
5.4	Carga hidráulica	68
5.5	Análisis de los modelos de regresión	73
5.6	Resultados de la simulación en Fluent®	75
5.7	80
5.8	Análisis de imágenes.....	80
5.8.1	Diámetro de burbujas.....	80
6	ESCALAMIENTO Y OPTIMIZACIÓN ECONÓMICA.....	87
7	CONCLUSIONES.....	89
8	BIBLIOGRAFÍA.....	92
9	SIMBOLOGÍA	99

ÍNDICE DE TABLAS.

TABLA 1-1 FACTORES INVOLUCRADOS EN LA EFICIENCIA DE LA ELECTROCOAGULACIÓN.	9
TABLA 2-1 CLASIFICACIÓN DE REACTORES DE ELECTROCOAGULACIÓN.	12
TABLA 4-1 VALORES MÍNIMO, MÁXIMO Y CENTRO DEL DISEÑO DE EXPERIMENTOS.	36
TABLA 4-2 VARIABLES DE DISEÑO Y OPERACIÓN PARA LA EXPERIMENTACIÓN.	38
TABLA 4-3 UNIDADES FUNDAMENTALES DE LAS VARIABLES.	46
TABLA 5-1 RESUMEN DE RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE RESPUESTAS SIN CONSIDERAR LOS CENTROS	50
TABLA 5-2 COMPARACIÓN VOLTAJE REAL CONTRA VOLTAJE TEÓRICO.	51
TABLA 5-3 RESUMEN DE ANOVA PARA EL VOLTAJE.	52
TABLA 5-4 RESUMEN ANOVA PARA LA EFICIENCIA DE VOLTAJE.	55
TABLA 5-5 CONCENTRACIÓN DE ALUMINIO TEÓRICO, REAL Y EFICIENCIA DE COAGULANTE.	57
TABLA 5-6 ANOVA PARA LA CONCENTRACIÓN DE COAGULANTE.	58
TABLA 5-7 RESUMEN ANOVA PARA LA EFICIENCIA DE GENERACIÓN DE COAGULANTE	60
TABLA 5-8 TIEMPOS DE RESIDENCIA HIDRÁULICOS DEL SISTEMA, EN PRESENCIA DE GAS (CG) Y AUSENCIA (SG).	61
TABLA 5-9 TABLA RESUMEN DEL ANOVA PARA LOS TRH_CG	62
TABLA 5-10 PROMEDIO DE PORCENTAJE DE ZONAS MUERTAS Y CORTO CIRCUITO EN CADA CASO DE ESTUDIO.	65
TABLA 5-11 TABLA RESUMEN ANOVA PARA LAS ZM_CG.	65
TABLA 5-12 COMPARACIÓN DE CARGAS HIDRÁULICAS.	69
TABLA 5-13 TABLA RESUMEN DEL ANOVA PARA LA CARGA HIDRÁULICA	70
TABLA 5-14 TABLA DE REGRESIÓN CARGA VERTEDOR SIN GAS.	72
TABLA 5-16 RESUMEN COMPARATIVO DE LOS MODELOS AJUSTADOS Y LA ECUACIÓN ACOPLADA	73
TABLA 5-17 DIFERENCIAS DE LOS MODELOS AJUSTADOS POR EL DISEÑO DE EXPERIMENTOS Y LA ECUACIÓN ACOPLADA	74
TABLA 5-18 DIÁMETROS DE INTERÉS ZONA IZQUIERDA EXPERIMENTO UNO.	82
TABLA 5-19 RESUMEN ANOVA PARA DIÁMETRO DE BURBUJA	83
TABLA 5-20 NÚMERO DE BURBUJAS MÍNIMO Y MÁXIMO DE ACUERDO CON LOS DIÁMETROS LÍMITE	85
TABLA 5-21 VELOCIDADES DE LAS BURBUJAS DE GAS	86
TABLA 6-1 COMPARACIÓN DE DISEÑOS POR MÉTODO Y ECUACIÓN.	87
TABLA 6-2 COMPARACIÓN DE DISEÑOS POR MÉTODO Y ECUACIÓN.	88
TABLA 6-3 COMPARACIÓN DE COSTOS POR MÉTODO Y ECUACIÓN.	88

ÍNDICE DE IMÁGENES

ILUSTRACIÓN 1-1 EJEMPLO DE TREN DE POTABILIZACIÓN CONVENCIONAL.	7
ILUSTRACIÓN 1-2 ESQUEMA DE LAS REACCIONES QUE TIENEN LUGAR EN UN REACTOR DE ELECTROCOAGULACIÓN (NAJE, ET AL., 2017).	8
ILUSTRACIÓN 1-3 MECANISMOS QUE SE COMBINAN DURANTE LA ELECTROCOAGULACIÓN	9
ILUSTRACIÓN 4-1 VARIABLES ELECTROQUÍMICAS E HIDRÁULICAS DE DISEÑO.	31
ILUSTRACIÓN 4-2 DIAGRAMA DE ACTIVIDADES.	32
ILUSTRACIÓN 4-3 FUENTE DE PODER SORESENSEN 150 A /20 V.	32
ILUSTRACIÓN 4-4 ESQUEMA ARREGLO EXPERIMENTAL.	33
ILUSTRACIÓN 4-5 REFUERZO EXTERNO DEL MODELO FÍSICO.	34
ILUSTRACIÓN 4-6 CONDUCTÍMETRO 5STAR.	34
ILUSTRACIÓN 4-7 BALANZA ANALÍTICA.	35

ILUSTRACIÓN 4-8 ROTÁMETRO CAPACIDAD 75 L/MIN	35
ILUSTRACIÓN 4-9 CÁMARA MOTIONSCOPE MONOCROMÁTICA.....	36
ILUSTRACIÓN 4-10 ESQUEMA DE LA UBICACIÓN DE LAS MEDICIONES REALIZADAS.....	39
ILUSTRACIÓN 4-11 ESQUEMA DE LAS ZONAS DE CAPTURA, SUPERIOR (1), MEDIA (2), INFERIOR (3), IZQUIERDA (A), MEDIA (B) Y DERECHA (C).....	40
ILUSTRACIÓN 4-12 GEOMETRÍA DEL REACTOR DE ELECTROCOAGULACIÓN DE LA PRUEBA OCHO.	41
ILUSTRACIÓN 4-13 EJEMPLO DE MALLADO DE CÁLCULO PARA EL MODELO.	42
ILUSTRACIÓN 4-14 CONDICIONES DE FRONTERA UTILIZADAS EN LA MODELACIÓN.	42
ILUSTRACIÓN 5-1 GRÁFICO DE PROBABILIDAD NORMAL PARA EL VOLTAJE.	52
ILUSTRACIÓN 5-2 INTERACCIONES DE SEPARACIÓN DE PLACAS Y DENSIDAD DE CORRIENTE EN LA CAÍDA DEL VOLTAJE.	53
ILUSTRACIÓN 5-3 INTERACCIONES DE NÚMERO DE PLACAS Y DENSIDAD DE CORRIENTE EN LA CAÍDA DEL VOLTAJE	53
ILUSTRACIÓN 5-4 GRÁFICO DE DIAGNÓSTICO PARA LA CAÍDA DE VOLTAJE.....	54
ILUSTRACIÓN 5-5 DIAGRAMA DE PARETO PARA LA EFICIENCIA DE VOLTAJE	55
ILUSTRACIÓN 5-6 SUPERFICIE DE RESPUESTA PARA LA RELACIÓN SEPARACIÓN Y NÚMERO DE PLACAS.	56
ILUSTRACIÓN 5-7 SUPERFICIE DE RESPUESTA PARA LA EFICIENCIA DE VOLTAJE, RELACIÓN DENSIDAD DE CORRIENTE NÚMERO DE MÓDULOS.	56
ILUSTRACIÓN 5-8 EFECTOS PRINCIPALES PARA LA VARIABLE DE RESPUESTA COAGULANTE. A) NÚMERO DE PLACAS, B) SEPARACIÓN DE LAS PLACAS, C) DENSIDAD DE CORRIENTE Y D) CONCENTRACIÓN DE COAGULANTE POR MÓDULO.....	57
ILUSTRACIÓN 5-9 CORRIENTE SUMINISTRADA Y SU EFECTO EN LA CONCENTRACIÓN DE COAGULANTE.....	58
ILUSTRACIÓN 5-10 INTERACCIÓN DE NM Y S PARA EL COAGULANTE.	59
ILUSTRACIÓN 5-11 DIAGRAMA DE PARETO PARA LA EFICIENCIA DE GENERACIÓN DE COAGULANTE.....	59
ILUSTRACIÓN 5-12 TIEMPO DE RESIDENCIA HIDRÁULICO PARA DISTINTAS SEPARACIONES CON REACCIÓN ELECTROQUÍMICA.....	61
ILUSTRACIÓN 5-13 PORCENTAJE DE AJUSTE DE LOS EFECTOS ESTANDARIZADOS.	62
ILUSTRACIÓN 5-14 INTERACCIÓN S E I EN LOS TRH.	63
ILUSTRACIÓN 5-15 INTERACCIÓN NM E S EN LOS TRH.	63
ILUSTRACIÓN 5-16 RESULTADOS DEL MODELO DE PRUEBA DE TRAZADORES PARA UN CASO DE ESTUDIO ..	64
ILUSTRACIÓN 5-17 DIAGRAMA DE PARETO PARA ZONAS MUERTAS.....	64
ILUSTRACIÓN 5-18 INTERACCIÓN DE LA SEPARACIÓN Y DENSIDAD DE CORRIENTE EN EL PORCENTAJE DE ZONAS MUERTAS.	66
ILUSTRACIÓN 5-19 INTERACCIÓN DEL NÚMERO DE MÓDULOS Y DE PLACAS EN EL PORCENTAJE DE ZONAS MUERTAS	66
ILUSTRACIÓN 5-20 DIAGRAMA DE PARETO PARA CORTO CIRCUITO	67
ILUSTRACIÓN 5-21 SUPERFICIE DE RESPUESTA PARA NÚMERO DE MÓDULOS Y DENSIDAD DE CORRIENTE. 67	67
ILUSTRACIÓN 5-22 SUPERFICIE DE RESPUESTA PARA SEPARACIÓN DE PLACAS Y NÚMERO DE PLACAS.....	68
ILUSTRACIÓN 5-23 DIAGRAMA DE PARETO PARA LA CARGA HIDRÁULICA.....	68
ILUSTRACIÓN 5-24 EFECTO DE NM E I EN LA CARGA HIDRÁULICA.	70
ILUSTRACIÓN 5-25 EFECTO NP E I EN LA CARGA HIDRÁULICA	71
ILUSTRACIÓN 5-26 GRÁFICO DE MODELO DE REGRESIÓN AJUSTADO.....	73
ILUSTRACIÓN 5-27 DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES ZONA INFERIOR REACTOR SIN GAS.....	75
ILUSTRACIÓN 5-28 DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES ZONA INFERIOR REACTOR, EXPERIMENTO DIECISÉIS IZQUIERDA CON GAS, DERECHA, SIN GAS.....	76
ILUSTRACIÓN 5-29 VELOCIDAD DE FLUJO EN LOS CANALES DE ASCENSO CASO 1.	77
ILUSTRACIÓN 5-30 VELOCIDAD DE FLUJO EN LOS CANALES DE ASCENSO (A) MÓDULO 1 Y (B) MÓDULO 4... 77	77
ILUSTRACIÓN 5-31 FRACCIÓN DE VOLUMEN DEL HIDRÓGENO GENERADO.....	78
ILUSTRACIÓN 5-32 VELOCIDAD DE FLUJO ZONA INFERIOR (A) CASO 10 Y (B) CASO 12.	79

ILUSTRACIÓN 5-33 VECTORES DE VELOCIDAD DE FLUJO ZONA INFERIOR, MÓDULO 4.....	80
ILUSTRACIÓN 5-34 IMÁGENES DE CÁMARA ALTA DEFINICIÓN Y VELOCIDAD.	81
ILUSTRACIÓN 5-35 FILTRADO DE IMAGEN Y CONTEO.....	81
ILUSTRACIÓN 5-36 FRECUENCIA DE APARICIÓN DE DIÁMETROS EXPERIMENTO UNO, ZONA INFERIOR IZQUIERDA.	81
ILUSTRACIÓN 5-37 DIAGRAMA DE PARETO PARA EL DIÁMETRO DE BURBUJA	83
ILUSTRACIÓN 5-38 SUPERFICIE DE RESPUESTA CON LA INTERACCIÓN DE NÚMERO DE PLACAS Y DENSIDAD DE CORRIENTE.....	84
ILUSTRACIÓN 5-39 DIÁMETROS MEDIANOS DE LA ZONA INFERIOR CON RESPECTO AL CAUDAL	84

1 INTRODUCCIÓN

El sistema de potabilización más utilizado en México es la clarificación convencional, la cual se conforma por: coagulación, floculación, sedimentación, filtración, desinfección y tratamiento de lodos (Ilustración 1-1).

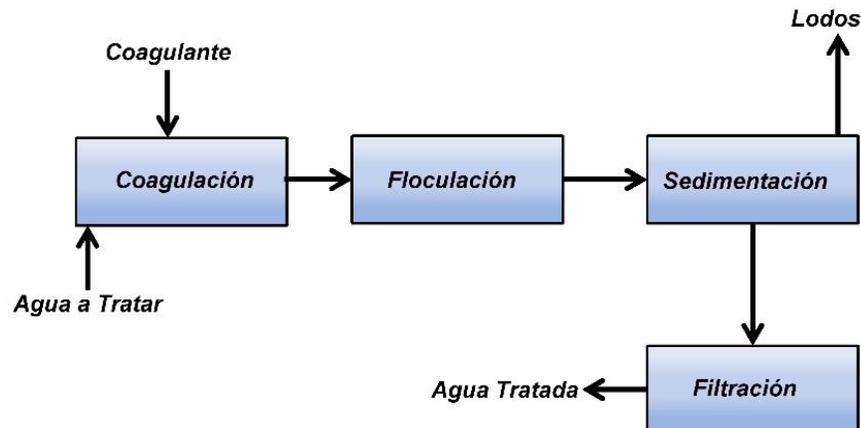


Ilustración 1-1 Ejemplo de tren de potabilización convencional.

La coagulación es un proceso de desestabilización química de las partículas coloidales, que se produce al neutralizar las fuerzas que las mantienen separadas, por medio de la adición de coagulantes químicos y aplicación de energía de mezclado (Andía-Cárdenas, 2000).

La electrocoagulación (EC) es una propuesta alterna y emergente a la coagulación química (CQ). Este tipo de tratamiento presenta las siguientes ventajas sobre la coagulación convencional:

- No requiere el uso de químicos para la formación del coagulante, produciendo un 50% menos de lodos (Phutdhawong, et al., 200), (Yousuf, et al., 2001), (Tsouris, et al., 2001).
- Elimina la necesidad de almacenamientos y el uso de productos químicos.
- Produce floculos de mayor tamaño que los formados en la coagulación química y con menor cantidad de agua ligada.
- Alta efectividad en la remoción de un amplio rango de contaminantes.
- El paso de la corriente eléctrica favorece el movimiento de las partículas de contaminantes de menor tamaño, incrementando la coagulación (Mollah et al, 2001).

- En el tratamiento de agua potable resulta más eficiente que la CQ, debido a que esta última aumenta sus costos por la disposición de un mayor volumen de lodos (Rodríguez, 2014).
- Las burbujas de gas producidas durante la electrólisis permiten transportar los contaminantes, para su posterior remoción (Rodríguez, 2014).
- La producción del hidróxido *in situ* favorece una mínima variación del pH y la reducción de los sólidos disueltos, contrario al caso del uso de productos químicos.

Sin embargo, este tipo de tratamiento también cuenta con ciertas desventajas, entre las cuales se puede mencionar:

- El costo puede ser elevado en ciertas regiones de acuerdo con las tarifas de la energía eléctrica de la zona.
- El hidrógeno generado en los electrodos por la electrólisis del agua puede afectar la eficiencia del proceso. Si la velocidad del flujo es elevada puede romper el floculo y desestabiliza la sedimentación.
- Pasivación de los electrodos, con el consecuente aumento del voltaje requerido para hacer pasar la corriente.

Esta tecnología se basa en el uso de electrodos de sacrificio para la producción de coagulantes que remuevan a los contaminantes. La Ilustración 1-2, muestra un esquema de las reacciones que tienen lugar en un reactor de electrocoagulación, donde se puede observar que se requiere el paso de corriente eléctrica a través de electrodos, los cuales se oxidan para generar el coagulante utilizado en la desestabilización de las partículas contaminantes. La corriente eléctrica suministrada proporciona la fuerza electromotriz que da lugar a las reacciones electroquímicas dentro del sistema.

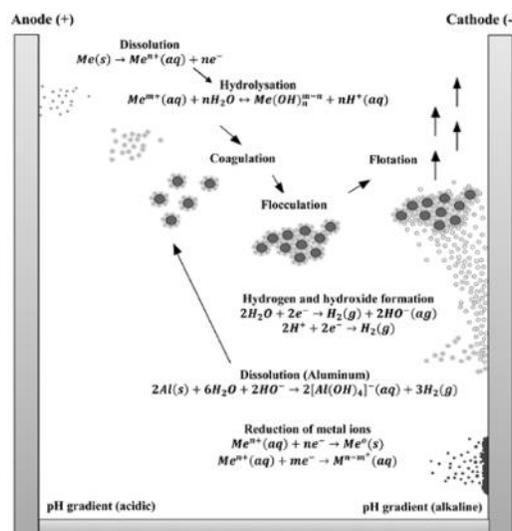


Ilustración 1-2 Esquema de las reacciones que tienen lugar en un reactor de electrocoagulación (Naje, et al., 2017).

Dentro de la EC se combinan tres mecanismos que influyen en su eficiencia: electroquímico, fisicoquímico e hidráulico (Ilustración 1-3).

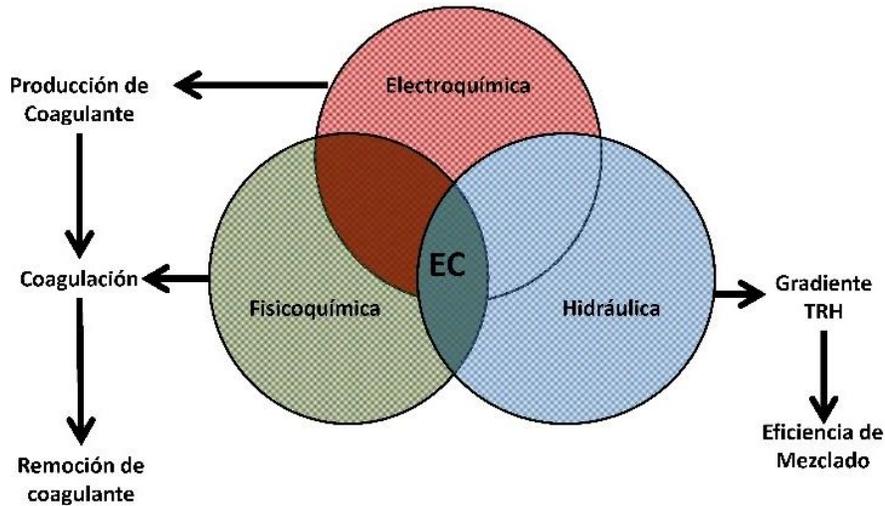


Ilustración 1-3 Mecanismos que se combinan durante la electrocoagulación

La Tabla 1-1, enlista algunos de los factores involucrados en la eficiencia de la electrocoagulación, para cada uno de los mecanismos.

Tabla 1-1 Factores involucrados en la eficiencia de la electrocoagulación.

Fisicoquímicos	Electroquímicos	Hidrodinámicos
Conductividad	Densidad de corriente	Gradiente de mezcla
pH	Material de los electrodos	Velocidad de flujo
Tipo de contaminante	Cambio de polaridad	Tiempo de residencia hidráulico
	Distancia entre electrodos	Tipo de flujo (a presión o a gravedad))
	Tipo de conexión eléctrica	

Los aspectos fisicoquímicos y electroquímicos son muy estudiados en la literatura, sin embargo, no se ha reportado una metodología definida para el diseño y construcción de un reactor de electrocoagulación (Rodríguez, 2014); la relación de las variables de operación con la hidrodinámica del sistema tiene muchas dudas que es necesario despejar para optimizar el diseño de este tipo de reactores.

En lo que respecta a la producción de gas, se desconoce la influencia que tiene en los aspectos hidráulicos, la operación y eficiencia del proceso. Es necesario evaluar de manera integral las variables geométricas y operacionales presentes en el fenómeno electroquímico, de manera que permita analizar la influencia de las

variables independientes de diseño (densidad de corriente, separación entre electrodos, número de electrodos, número de módulos), reportada por diferentes autores, y que están relacionadas con la operación y la hidráulica del sistema como son: caída de voltaje, pérdida de carga hidráulica, coagulante generado, diámetro de burbujas, zonas muertas, cortos circuitos y tiempo de residencia hidráulico.

En este trabajo se propone obtener una ecuación para el diseño de reactores de electrocoagulación a superficie libre y flujo vertical mixto, partiendo de los conceptos y fenómenos físicos presentes durante la reacción electroquímica, incluyendo la presencia del gas producto de esta reacción.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 ELECTROCOAGULACIÓN

2.1.1 Generalidades

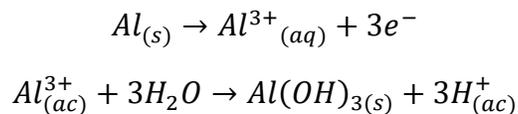
Entre los electrodos de un reactor de EC ocurren una serie de reacciones que dan como resultado el transporte de electrones. En el ánodo (electrodo de sacrificio) se oxida el catión, lo que provee de iones metálicos al agua (Restrepo-Mejía, et al., 2006); estos iones desestabilizan las partículas contaminantes presentes en el agua y forman agregados conocidos como flocs, mismos que posteriormente se eliminan por procesos de sedimentación y/o filtración. Mollah et al., (2001) consideran que en el proceso de electrocoagulación intervienen tres etapas: la formación del coagulante por la oxidación electrolítica del ánodo, la desestabilización de los contaminantes y la formación de flóculos por efectos del coagulante.

El proceso de electrocoagulación se rige por la Ley de Faraday, la cual indica que la cantidad de sustancia formada por electrólisis es proporcional a la cantidad de carga que pasa a través del sistema.

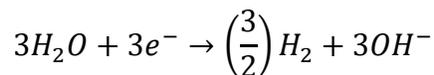
A diferencia de la coagulación química (CQ), donde el coagulante se adiciona al sistema como agente químico, en la electrocoagulación (EC) el coagulante es generado in situ mediante las reacciones dadas por la disolución de iones del metal del electrodo de sacrificio, los cuales se producen por la oxidación del ánodo.

De acuerdo con la literatura, la selección del material para el electrodo depende de la afinidad con el contaminante a tratar, sin embargo, los materiales de mayor uso son el hierro (Fe) y el aluminio (Al). El presente trabajo se centra en el uso de electrodos de aluminio, Hashim, et al. (2017) menciona que las reacciones ocurridas son las siguientes:

En el ánodo:



En el cátodo:



2.1.2 Clasificación de los reactores

Los reactores de electrocoagulación se pueden clasificar, según el tipo de flujo, en batch o continuo; de acuerdo con su funcionamiento, en cerrados (a presión) o abiertos (superficie libre); dependiendo de la trayectoria que tiene el flujo, en ascendente, descendentes o mixto (ascendente-descendente) y por la forma y sitio de colocar los electrodos, en coaguladores, floculadores o sedimentadores. La Tabla 2-1, muestra una clasificación general de los reactores de electrocoagulación (Mendieta, 2013).

Tabla 2-1 Clasificación de reactores de electrocoagulación.

Reactores de electrocoagulación	Funcionamiento	A presión
		A superficie libre
	Trayectoria del flujo	Horizontal
		Vertical
	Modo de circulación del agua	Monocanal
		Multicanal
	Tipo de conexión eléctrica	Monopolar
		Bipolar
	Finalidad del reactor	Electrocoagulación
		Electroflotación

2.1.2.1 Por funcionamiento

Los reactores pueden trabajar a presión (tuberías) o a superficie libre (canales), la selección impacta de manera directa en los requerimientos energéticos y de espacio para su implementación. En ambos tipos de reactor la carga hidráulica es una variable de importancia para el diseño, puesto que se relaciona con la energía mínima necesaria para mover el agua dentro del sistema.

En los reactores a presión se presenta la acumulación del gas producido por la reacción electroquímica (Gelover, et al., 2013), lo que puede originar serios problemas de pérdidas de carga hidráulica, taponamiento en su interior, reducción de la sección de flujo, cambio en las líneas de flujo, entre otros. En los de superficie libre se puede evitar esta problemática, al permitir la desgasificación.

2.1.2.2 Por trayectoria de flujo

La dirección del flujo es importante cuando se requiere aprovechar el movimiento generado por la producción de hidrógeno y oxígeno; depende de la orientación de los electrodos y del ingreso del agua a tratar (Mendieta, 2013).

2.1.2.3 Por circulación del flujo

Los reactores de EC pueden ser diseñados con un solo canal de flujo o con múltiples canales, dentro de los cuales se lleva a cabo la reacción electroquímica.

Las celdas de canales múltiples permiten tener velocidades bajas en cada canal, ya que el flujo se reparte (Piña-Soberanis, et al., 2011), pero si la pasivación no puede reducirse, se recomienda aumentar la velocidad del flujo en el sistema utilizando un solo canal (Chen, 2004).

2.1.2.4 Por tipo de conexión eléctrica

La distribución bipolar trabaja a menor intensidad de corriente y mayor voltaje en comparación con la monopolar. Sin embargo, las celdas bipolares son de fácil distribución dentro del reactor y el espacio entre los electrodos es pequeño puesto que la corriente se alimenta por un par de electrodos alimentadores (Mendieta, 2013).

2.1.2.5 Por el tipo de tratamiento

Esta última clasificación se refiere a las funciones que puede realizar el reactor: solo para dosificar; dosificar y flocular en la misma unidad; o dosificar, flocular y sedimentar. También se puede llevar a cabo, al mismo tiempo o de forma independiente, la remoción de los contaminantes por flotación de los flóculos generados durante la reacción electroquímica, (Mendieta, 2013).

2.1.3 Parámetros de diseño

Se han realizado diferentes estudios sobre esta tecnología, Holt et al. (2005), Emamjomeh y Sivakumar (2009), Piña-Soberanis et al. (2011), Khanegar y Saroha (2013) y Omprakash et al. (2013) por mencionar algunos. Sus trabajos se han enfocado primeramente en validar y revisar las ventajas de la electrocoagulación como una alternativa a la coagulación química y por otro lado han revisado la variación de diferentes parámetros de diseño con la finalidad de optimizar el proceso.

De lo anterior se ha observado que los parámetros que tienen mayor efecto en la eficiencia del proceso de electrocoagulación durante la remoción de contaminantes son: la densidad de corriente, la dosis de coagulante y el número y separación entre los electrodos.

2.1.3.1 Densidad de corriente

La densidad de corriente es la cantidad de corriente eléctrica aplicada por unidad de área ($\text{amperios}/\text{m}^2$), ecuación 2-1. A densidades altas las probabilidades de pasivación de los electrodos aumenta, sin embargo, cuando se tiene densidades de corriente baja, se requiere aumentar el volumen del reactor, impactando en los tiempos de residencia y por ende en el tamaño del reactor y los costos de inversión Ghosh, et al. (2008) y Deshpande, et al. (2010).

$$i = \frac{I}{A_r} \quad 2-1$$

La diferencia del potencial está definida como el trabajo necesario para transferir una unidad de carga y depende principalmente de la conductividad de la solución, de la corriente eléctrica aplicada, de la separación de los electrodos en general de la resistencia que oponga el sistema al paso de la corriente; por lo tanto, no depende directamente de la densidad de corriente.

Gelover et al., (2014) realizaron estudios sobre el impacto de la densidad de corriente en la remoción de sílice en un reactor con arreglo de electrodos en paralelo, los cuales forzaban al flujo a un movimiento de ascenso y descenso a través de ellos. Encontraron que es posible tener elevadas eficiencias de tratamiento con densidades de corriente bajas, sin embargo, para lograr este cometido se requiere de un alto número de placas, lo cual deriva en un aumento en el tamaño del reactor.

2.1.3.2 Dosis de coagulante

La dosis de coagulante requerida está en función del contaminante que se desea tratar, pero la cantidad suministrada electroquímicamente es función de la ley de Faraday (Larue, et al., 2003), (Mollah, et al., 2004), donde la cantidad de moles suministrado *in situ* es directamente proporcional a la corriente del sistema y al tiempo de aplicación de la misma, por unidad de volumen (2-2).

$$C_t = \frac{ItPM}{VnF} \quad 2-2$$

Donde C_t corresponde a la masa de sustancia oxidada durante el proceso (g/L), I es la corriente [ampere (coulomb/s)], t el tiempo de aplicación de la corriente(s), V el volumen de tratamiento (L), n es el número de electrones transferidos por moles de reactivo transformado, F la constante de Faraday (96,500 coulomb/mol) y PM Peso Molecular en (g/mol).

2.1.3.3 Separación entre electrodos

La separación de los electrodos también afecta las reacciones de electrólisis en el reactor. De acuerdo con (Sahu, et al., 2013), durante la electrólisis la solución en las cercanías del cátodo tiene mayor concentración de coagulante debido a la influencia de la capa límite. Por otro lado, el volumen entre electrodos se llena parcialmente de gases durante la electrólisis, incrementando la resistencia eléctrica. La verticalidad de los electrodos y su geometría, juegan un papel importante en la liberación de los gases, por lo que, de acuerdo con la experimentación, las configuraciones abiertas con electrodos verticales han probado tener mejor

efectividad con respecto a la flotación o precipitación de los lodos (Golder, et al., 2007).

Por su parte (Khandegar & Anil, 2013), indican que la distancia de los electrodos juega un papel significante en la electrocoagulación, debido a que el campo electrostático depende de la distancia entre el ánodo y el cátodo. Ellos encuentran que con distancias pequeñas la eficiencia de remoción es baja, debido a que algunos flocs generados, al sedimentar, se degradan por la colisión debida a la atracción electrostática.

Sin embargo, la resistencia al paso de la corriente aumenta con la separación de los electrodos, lo que aumenta los requerimientos de voltaje y por lo tanto los costos de operación.

2.1.3.4 Número de electrodos

Chen (2004), menciona que el número de electrodos a utilizar debe estar entre 10 y 100. Por otro lado, Piña-Soberanis et al. (2011), mencionan que distintos autores no reportan información sobre la distancia, tamaño o área activa de los electrodos. Y como se ha mencionado, son parámetros importantes para el diseño.

El número y orientación de los electrodos depende de la configuración del reactor y del tipo de flujo que se desea en el sistema. Principalmente se busca aumentar la superficie de contacto con el agua a tratar y disminuir los tiempos de residencia hidráulicos.

También influye directamente en la densidad de corriente y por lo tanto en la pasivación de estos. En configuraciones de reactores por módulos en serie, la distribución de los electrodos favorece la mezcla del flujo en todo el reactor, pero implica que en cada módulo se produzca una fracción del coagulante deseado, es decir, la dosis requerida se obtendrá al final del último módulo que conforme al reactor.

2.1.3.5 Configuración del reactor

Villegas (2011), menciona que en los reactores a presión con flujo pistón horizontal entre canales (electrodos), la energía de mezclado se disipa mediante la pérdida de carga debido a los cambios de dirección, reducciones y ampliaciones de las secciones y fricción en tramos rectos. Sin embargo, la pérdida de carga en su experimentación se debió principalmente a la presencia de depósitos en la superficie de los electrodos.

Gelover et al., (2012) trabajaron con un reactor de sección transversal rectangular, con electrodos separados 0.6 cm y flujo horizontal tipo laberinto formado por las placas. Esta geometría permitió reducir las zonas muertas y cortos circuitos desde el punto de vista hidráulico. También hicieron pruebas para la remoción de sílice en reactores de electrocoagulación cerrados con flujo vertical y observaron que la

remoción de sílice fue mayor a altas velocidades, debido al arrastre de los depósitos formados sobre los electrodos.

Posteriormente, Gelover et al. (2013), compararon configuraciones de reactores abiertos y cerrados en el tema del acondicionamiento del agua para la industria y concluyeron que la configuración abierta permite alcanzar los mismos niveles de remoción que los reactores cerrados, pero con menores valores de potencial eléctrico; además lograron tiempos de operación mayores a los obtenidos con los sistemas cerrados. Lo anterior representa un avance en el desarrollo de esta tecnología, sin embargo, aún existen dudas sobre el efecto combinado de los parámetros de diseño en los reactores de electrocoagulación.

Debido a la eficiencia de los reactores con flujo vertical abiertos demostrado por Gelover et al. (2012 y 2013), el presente trabajo se enfoca en la modelación hidráulica para el diseño de este tipo de reactores.

Como consecuencia de las reacciones electroquímicas, existe la producción de oxígeno en el ánodo y de hidrógeno en el cátodo (Chen, 2004 y Mollah et al., 2004), dicha producción de gases promueve la separación de partículas dentro de la solución Matis y Peleka (2010), Mansour et al. (2007), Comninellis y Chen (2010). Los diámetros de burbuja que se han encontrado oscilan entre 17 y 50 μm . Un factor importante que afecta de manera significativa el tamaño de la burbuja es el tipo de material del electrodo, la densidad de corriente y el pH. Rodríguez (2014) reporta que las burbujas de hidrógeno son producidas a pH neutro o ácido.

La distribución de corriente en un reactor electroquímico fue determinada experimentalmente por Bissang (1993); para tal fin realizó trabajos con electrodos monopolares y bipolares, en los cuales notó que la cinética en los electrodos era influenciada por la convección inducida por las burbujas y por el electrolito. La distribución de corriente muestra un mínimo, el cual es consecuencia de los cambios del coeficiente de intercambio de masa a lo largo del reactor, debido a la combinación de los efectos de la fuerza convectiva y convección inducida de las burbujas.

Nagai et al. (2003), estudiaron el efecto de la burbuja entre los electrodos a través de la fracción de vacío entre los mismos. Los resultados muestran que al incrementar el volumen de vacío y reducir la separación de los electrodos, da como resultado un decremento en la eficiencia del sistema.

En uno de los trabajos de modelación y simulación de la configuración de un electrodo vertical para el proceso de electrolisis bifásica (Mandin, et al., 2005), la presencia de burbujas modifica las propiedades eléctricas, así como también el transporte difusivo de las especies electroactivas y la densidad de corriente. Estos autores inicialmente trabajaron con un modelo Lagrangiano para la modelación de las burbujas que conforman la partícula discreta, donde estas últimas fueron consideradas como esferas rígidas de un diámetro predefinido. Dentro de los

resultados obtenidos en este estudio, se tiene que la línea de carga eléctrica sobre el electrodo en toda la longitud está fuertemente influenciada por el espesor de la capa de burbujas que se forma cuando el líquido se encuentra estancado, por otro lado, si el electrolito se encuentra en movimiento, entonces este influye en la velocidad de arrastre, reduciendo la fracción de vacío, y de esta manera el problema eléctrico no depende principalmente del tamaño de la burbuja.

Mat y Aldas (2005), crearon un modelo matemático para el flujo bifásico en una celda electroquímica. Encontraron que, tanto la densidad de corriente como el tamaño de la burbuja, tienen efecto en la tasa de liberación que afecta los perfiles de velocidad en la celda.

También se realizó el modelo y la simulación numérica del proceso de producción de hidrógeno en una configuración de electrodos verticales (Mandin, et al., 2006), mostrando en sus resultados la influencia de las propiedades hidrodinámicas, eléctricas, térmicas y químicas en celdas de electrólisis a escala laboratorio. Para esta simulación utilizaron los *programas* computacionales de volúmenes finitos Fluent® y Fludyn®. De sus investigaciones logran comprobar a escala macroscópica que su modelo es acertado.

Mandin et al. (2008), realizaron estudios para la predicción de las velocidades de deposición y la estructura del depósito, con fuerzas boyantes uniformes. En dicho estudio se concluye que la gravedad juega un papel importante en la electrólisis, así como en las diferentes fases que se tienen en el flujo. Así mismo, realizaron la modelación y simulación matemática de la producción local de gas a escala industrial en reactores verticales. Tomaron como hipótesis que las burbujas modificaban el transporte de calor y electricidad, además de ser precursoras del movimiento, por lo cual consideraron investigar leyes fenomenológicas para la escala de las burbujas. Pese a que la modelación no fue totalmente rigurosa, permite realizar cálculos de la electroquímica y flujos bifásicos.

Por otro lado, también se han realizado estudios sobre la electroflotación, la cual se basa en la generación de burbujas que permiten que las partículas más finas puedan ascender en el fluido. Shahjahan et al. (2010), en su estudio determinan el tamaño de la burbuja de hidrógeno que se genera en función de la densidad de corriente y la geometría del electrodo. Los diámetros resultantes variaron entre 15 y 23 μm y la corriente tuvo poca influencia en un rango de 150 – 350 A/m^2 . El diámetro al equilibrio está relacionado con la producción del hidrógeno, la velocidad de nucleación y la concentración del gas disuelto en el flujo.

Tangphant et al. (2010), reportaron que la concentración de la solución, la distancia entre los electrodos y la densidad de corriente, pueden ser correlacionadas con la tasa de producción de la reacción electrolítica en un 90.5%; además, la fracción de vacío también tiene un efecto en la flotación de la burbuja formada durante la reacción.

Van Damme et al. (2010), presentaron un algoritmo para la nucleación de burbujas en electrodos, incluyendo el crecimiento de la burbuja y la pasivación del electrodo debido a la fracción de vacío.

Sarkar et al. (2010), estudiaron y determinaron el tamaño de la burbuja de hidrógeno generada, como una función de la densidad de corriente y la geometría del electrodo. Demuestran que la densidad de corriente no tiene influencia en el diámetro pero que la tasa de nucleación aumenta al incrementar la densidad de corriente.

Por su parte, Botello et al. (2011), trabajaron con tres electrolitos inorgánicos, encontrando que la concentración del electrolito es el principal factor en la variación del diámetro de las burbujas. Los resultados obtenidos fueron estimados con análisis digital de imágenes.

Tangphant et al. (2014), proponen un modelo matemático entre dos electrodos, considerando una combinación de la conductividad, la fracción de volumen vacío y las velocidades de las burbujas que ascienden.

2.2 TÉCNICAS DE MEDICIÓN DE PARTÍCULAS EN FLUJOS MULTIFÁSICOS

Para tener un mejor entendimiento de la interacción de los gases con el medio líquido, es necesario obtener información referente a la distribución y diámetros de las burbujas generadas por la reacción electroquímica y analizar su relación con las variables de diseño.

Se han desarrollado diferentes métodos que se enfocan en la medición de la velocidad de los fluidos. Estos métodos se dividen principalmente en intrusivos o no intrusivos, dependiendo de la necesidad de introducir algún cuerpo en el campo de flujo a medir. Entre las propuestas se tiene la velocimetría de partículas por imágenes, la estero microscopía y la medición por medio de sondas ópticas.

2.2.1 Velocidad de partículas por seguimiento de imágenes (PIV).

La velocimetría por imágenes de partículas ha aumentado su uso, sobre todo debido a la mejora en la capacidad de cómputo y en los equipos fotográficos, lo cual lleva a que el método sea más conocido y utilizado. Se trata de una técnica no intrusiva que es ampliamente utilizada en la mecánica de fluidos, con la finalidad de obtener mediciones locales de algunos parámetros presentes en el fluido.

Esta técnica se utiliza principalmente en la medición de las velocidades instantáneas de los fluidos, así como de las diferentes fases existentes, permitiendo parametrizar a estos últimos. Otro de los usos que ha tenido esta técnica se encuentra en el estudio y comportamiento de los patrones de flujo, vorticidad y turbulencia.

Según la aplicación, el montaje y la metodología general para la adquisición de las imágenes y el tratamiento de estas varían, ya sea en dos dimensiones o tres. A continuación, se hace una revisión de diferentes trabajos que se han realizado y las características de cada uno de ellos.

El principio básico del PIV es iluminar las partículas presentes en las líneas de flujo de estudio y realizar capturas sucesivas de imágenes o video. Es importante conocer el tiempo transcurrido entre la captura de ambas imágenes y posteriormente se procede a calcular la velocidad de una o varias partículas, considerando la distancia recorrida entre ambas imágenes y dividiendo entre el tiempo de captura de la cámara o en su caso de la secuencia de video.

Stikland et, al (1997), realizaron estudios de velocimetría de partículas por imágenes del crecimiento y desprendimiento de una burbuja, por medio de fotografías de alta velocidad. El equipo utilizado para llevar a cabo este estudio se compone de una hoja de haz luminoso generado por un espectro físico de 5 W de-ion argón y lentes cilíndricos. El proceso de la formación de las burbujas fue filmado con una cámara Hitachi 16 HM de alta velocidad con un rango de cuadros de 500 a 1000 tomas por segundo.

Reyes et al. (2003), realizaron investigaciones relacionadas con la velocimetría por seguimiento de partículas, para el estudio de un sistema trifásico con nematodos entomopatógenos. Utilizaron una columna en acrílico llena de agua a la que se le inyectaron burbujas de aire, la cual en la zona de captación contó con una caja de corrección óptica. Para el montaje se utilizó una cámara CCD Kodak Megaplus ES 1.0 que capturaba secuencias de 10 – 100 imágenes con tiempos de exposición de 0.5 ms, una fuente de iluminación (lámpara de halógeno de 500 watts) y espejos planos de precisión para reflejar la luz. Todas las imágenes que capturaron fueron adquiridas mediante el *programa* MAX y analizadas con IMAQ Vision Builder (National Instrument).

Martínez (2003), presenta un análisis tridimensional de la fracción volumétrica de gases en un flujo vertical con inyección de burbujas, por medio de la velocimetría por imágenes fotográficas digitales de sombras. Para la realización de este estudio montó un tubo vertical de 50.13 mm de diámetro y 2 m de longitud, bombas y tanques provisto de un sistema de inyección de aire. La zona de adquisición de imágenes se encontraba rodeada de un tanque de plexiglás lleno de jarabe de maíz para reducir los efectos de refracción. Se utilizó también un arreglo de cortina de iluminación láser y cámara digital con una resolución de 1008 x 1008 pixeles y 8-bit en escala de grises localizada a 500 mm del centro del tubo.

López (2004), realizó el análisis del campo de velocidades mediante el uso de PIV en un flujo, al cual se le inyecta gas vertical ascendente. Para la captura de las imágenes utilizó un tubo de vidrio de 0.44 m de diámetro interior y 3 m de longitud, bombas, tanques de almacenamiento, generador de burbujas, medidores de flujo de agua y aire. Para la zona de captación se implementó un tanque de plexiglás, el

cual se llenó con jarabe de maíz para reducir los efectos de la refracción óptica del tubo cilíndrico de vidrio. Como equipo de adquisición de imágenes utilizó una cámara digital de alta resolución (1008 x 1008 pixeles) Kodak Megaplug ES 1.0 Class 11Y, tarjeta de adquisición de imágenes acompañada de un sistema de adquisición de datos IMAQ, el cual funcionaba a la par con el *programa* LabVIEW e IMAQ visión de National Instruments, láser gemelo Nd:YAG de alta energía (400 mJ) pulsado. E y espejos de alta energía que conducían el haz de luz láser hasta la zona de experimentación.

Seol et al. (2007), midieron las características de flujo medio en una pluma de burbujas por medio de velocimetría de partículas por imágenes. Para realizar esto se fabricó un tanque de Plexiglás con dimensiones de 38 x 38 x 80 cm, inyectando el aire por medio de un difusor. Se montó un equipo para un estudio típico de PIV, con un láser de doble pulso (Nd:YAG) para generar una hoja de luz por medio de lentes esféricas. Se utilizaron dos tipos de cámaras CCD (dispositivo de carga acoplada) y una cámara FlowMaster 3S con 12 bit de intensidad y resolución de 1280 x 1024 pixeles y dos cámaras Basler de 10 bit de intensidad y 1004 x 1004 de resolución.

Martinez et al. (2006), realizaron estudios sobre la velocimetría de partículas basados en imágenes digitales, el arreglo experimental utilizó un láser He-Ne (Helio-Neón), lente plano cóncavo, lente cilíndrica, tanque para fluido, inyector de burbujas, cámara CCD SONY XC-ST50 monocromática y el programa LABVIEW 7.1, para el procesamiento de las imágenes. Con la finalidad de tener los lentes con un diseño óptimo para las pruebas, se realizaron simulaciones con los programas OSLO y CODE V, de manera que el abanico de luz fuese adecuado para las pruebas, así como también visualizaron las posibles trayectorias del haz láser. Finalmente desarrollaron un algoritmo con la capacidad de capturar las imágenes, procesarlas y realizar el muestreo de las imágenes correlacionadas.

Torres et al. (2006), aplicaron esta tecnología en aerogeneradores para caracterizar el campo de velocidades en prototipos. El modelo experimental utilizado para sus estudios se realizó en un túnel de viento con una sección transversal 20 x 20 cm para la toma de imágenes. Para poder hacer uso del PIV se requirió iluminar la sección de toma con un haz de laser paralelo al flujo y capturaron las imágenes por medio de una cámara CCD. Para el sistema óptico se montó un espejo Newport Research Corp, con recubrimiento de aluminio y refractancia de 95, con la finalidad de centrar el haz de luz.

Pelcastre (2006), realiza el análisis de un flujo vertical con inyección de aire co-corrente y en contra corriente; para el montaje del equipo de PIV utilizó una cámara digital CCD, una fuente laser, sistema de sincronización para la cámara y una computadora con el *programa* Flowmanager.

Das et al. (2011), realizaron una investigación experimental de las características de burbujas individuales en un modelo frío de celda electrolítica de Hall-Hérault.

Para la obtención de las imágenes se utilizó una cámara de alta velocidad (FASTCAM-APX RS 250KC). El flujo continuo de burbujas fue fotografiado a 500 cuadros por segundo.

Botello et al. (2011), realizaron un estudio del efecto de electrolitos en soluciones acuosas sobre el tamaño de burbujas en columnas de gas-líquido, donde la medición del tamaño de las burbujas se determinó por medio de un cubo de cristal que rodeó a la columna en la zona de captura de imágenes, dicho cubo fue llenado con agua para evitar problemas de distorsión de la imagen por efecto de la curvatura de la columna principal. Las imágenes fueron obtenidas con una video cámara Sony Handycam DVC-VTR730 con aumento manual para enfoque de las burbujas, así mismo se utilizaron lámparas de 60 W para efectos de claridad de las burbujas, las cuales fueron colocadas a los lados del cubo con respecto a la ubicación de la cámara; la resolución del video fue de 240 x 320 pixeles.

Paredes (2012), realiza la determinación de distribución de tamaño de burbujas vía análisis de imágenes, para la captura de las cuales utilizó una cámara digital Nikon modelo D90, con lentes AF-S Micro de 60 mm y razón focal fija mínima de 2.8, el intervalo de tiempo existente entre capturas fue de un segundo y la resolución máxima de las imágenes de 4288 x 2848 pixeles, finalmente, para iluminar la zona de captura se utilizó un foco y una pantalla difusora. De igual forma utilizó una cámara TroubleSooter HR para videos de alta velocidad con resolución de 1280 x 1024 pixeles y 250 cuadros por segundo. La iluminación de este segundo montaje se realizó con un foco de 1000 Watts con una pantalla difusora revestida de papel vegetal.

2.2.2 Medición de burbujas por estéreo microscopios.

El principio básico de la medición de burbujas por estéreo microscopios es iluminar las partículas presentes en el medio de estudio y realizar capturas sucesivas de imágenes o video. La diferencia con el método de PIV, se relaciona con la escala de visualización del fenómeno.

Taboada et al (2003), aplica el análisis de imágenes en el mezclado de multifases por efectos de fermentación, el equipo óptico utilizado se compone de un estéreo microscopio Olympus SZ-STU1 (SZ1145) con magnificación de 1.8x a 11x con una distancia de 110 mm, las imágenes observadas fueron archivadas por medio de una videocámara digital Hitachi KP-D50 Color NTSC. La iluminación se realizó por medio de un estroboscopio (MVS-2600, EG&G Optoelectronics), transmitiendo la luz al interior por medio de una guía de fibra óptica de 0.4 mm de diámetro.

Galindo (2007), utiliza un sistema compuesto de una cámara digital de video de alta velocidad (Redlake Motion Pro HS4) que permite adquirir 5130 cuadros por segundo de 512 x 512 pixeles. Acopló a la cámara un boroscopio de prisma oscilante (Serie 5 de Olympus), para la adquisición de secuencias dinámicas de interacciones de las fases, la iluminación la realizó con una fuente de luz Arco Xenon de 180 W, directa

y de intensidad mayor a la luz estroboscópica, la luz la transmite al interior del tanque por medio de una guía de luz de fibra óptica acoplada al boroscopio.

Corkidi et al., (2008) realizaron el análisis digital de imágenes aplicada al estudio del cultivo de *Trichoderme Harzianum*. La tecnología que aplica se basa en la adquisición micro estereoscópica en dos y tres dimensiones. El equipo que utilizaron se compone de un estereomicroscopio, una fuente de iluminación estroboscópica transmitida a través de una guía de fibra óptica y sincronizada a dos cámaras de TV por medio de un dispositivo electrónico de fabricación propia. Para la generación de burbujas agregaron un difusor de gas. Una vez obtenidas las imágenes las analizaron por medio de algoritmos de filtración y segmentación de imágenes, como es el caso de la transformada de Houg.

En el análisis de múltiples fermentaciones utilizaron una cámara de alta velocidad (Motion ProHS-4, Redlake, USA) en el contenedor, el cual fue acoplado a un estereomicroscopio con magnificación variable (SZZ1145ESD, Olympus, USA), iluminando desde espaldas del modelo. Obtuvieron secuencias de entre 200 y 15,000 cuadros a 100 cuadros por segundo, magnificando la imagen a 1.8x en todos los casos y analizándolas posteriormente con el programa Image-Pro® Plus V.5.2. (Media Cybernetics, USA), para medición del diámetro de burbujas.

2.2.3 Medición de burbujas por películas calientes y fibras ópticas.

Dias et al. (1997), proponen un método que generaliza la estimación de la velocidad y tamaño de burbuja en un flujo. Para permitir la captura de imágenes rodean el modelo con una caja llena de agua para la corrección de la curvatura e insertan la probeta en un orificio de 2 mm de diámetro. La probeta se compone de dos sensores que miden la resistividad eléctrica del fluido que le rodea. Los sensores tienen un diámetro de 120 μm colocados en agujas de 700 μm , mismas que otorgan soporte a las probetas y al cable de conexión que lleva la señal al micrómetro.

Kiambi et al. (2001), investigaron el área interfacial entre agua y gas, por medio de fibras ópticas de doble sensor. Utilizaron una probeta óptica (RBI Instrumentation and Measure) con 3.2 mm de distancia entre las fibras ópticas y un sensor de 40 μm , con una frecuencia de muestreo de 2 – 6 kHz.

Le Corre et al. (2003), realizaron la comparación de probetas de cuatro sensores de conductividad desarrollada por TRSL (Therman –hydraulics and Reactor Safety Laboratory) y un sensor de fibra óptica de cuatro salidas desarrollado por la CEA (French Atomic Energy Commission). Este método de comparación de dos sensores es para el análisis de burbujas de gran tamaño. Las líneas de conductividad se componen de agujas de oro epóxico con diámetro de 200 μm . El sensor de cuatro canales permite analizar el índice de diferencia entre el agua y el gas por medio de un módulo de amplificación electrónico de alta velocidad desarrollado por RBI (Meylan, France).

Hervieu y Junqua (2004), demostraron las ventajas de las sondas de fibra óptica de cuatro canales en la medición de la concentración del área interfacial en la zona de oleaje de un fluido estratificado. Lo anterior lo realizaron en un circuito al aire libre. La sonda utilizada fue manufacturada en el CEA Grenoble, el espaciamiento entre fibras fue de 300 μm . La información se convirtió en una señal eléctrica análoga que se amplificó y procesó para su análisis. El sistema de acondicionamiento de señales fue manufacturado por RBI.

Chaumat et al. (2005), analizaron la confiabilidad de las fibras ópticas utilizadas en el análisis de burbujas en flujos bifásicos. La sonda que se utilizó es de doble filamento con diámetro de 40 μm y una distancia entre filamentos de 0.0020 m, las muestras se tomaron con una frecuencia de 10 kHz y tiempo de grabado de 200 segundos.

Murzyn et al. (2005), realizaron la medición de las características de las burbujas generadas en un salto hidráulico para distintos números de Froud, por medio de fibras ópticas de doble punta en diferentes sitios del salto hidráulico. Las mediciones fueron tomadas por una probeta óptica de dos canales para detección de fases (RBI), la cual se basa en análisis de señales generadas por el paso de las burbujas a través de la probeta. Las fibras ópticas usadas fueron de un diámetro de 10 μm con una separación de 1 mm además de un amplificador óptico y un circuito de salida.

3 MARCO TEÓRICO

3.1 DISEÑO DE EXPERIMENTOS

El diseño de experimentos (DDE) es la aplicación del método científico para generar conocimiento acerca de un sistema o proceso, mediante la planeación y realización de un conjunto de pruebas experimentales (Gutierrez & Salazar, 2004). De acuerdo con Tan et al. (2008), esta aplicación se ha ido consolidando como un conjunto de técnicas estadísticas y de ingeniería que permiten entender mejor el comportamiento del proceso.

Existen varios aspectos que pueden influir en la selección del diseño de experimentos a utilizar, el cambio en alguno de ellos deriva en la modificación del diseño en su totalidad. Dichos aspectos se enlistan a continuación:

- El objetivo del experimento.
- El número de factores a controlar.
- El número de niveles que se prueban en cada factor.
- Los efectos que interesa investigar.
- El costo del experimento, tiempo y precisión deseada.

Para una selección general se considera el objetivo del diseño como criterio de clasificación y los otros cuatro sirven para una subclasificación.

- Diseños para comparar dos o más tratamientos.
 - Diseño completamente al azar
 - Diseño de bloques completos al azar
 - Diseños en cuadrados latinos o grecolatinos
- Diseños para estudiar el efecto de varios factores sobre la(s) respuesta(s).
 - Diseños factoriales 2^k
 - Diseños factoriales 3^k
 - Diseños factoriales fraccionarios 2^{k-p}
- Diseños para determinar el punto óptimo de operación del proceso.
 - Diseños factoriales 2^k y 2^{k-p}
 - Diseño Plakett – Burmna
 - Diseños Simples
- Diseños para modelos de segundo orden.
 - Diseño central compuesto
 - Diseño Box – Behnken
 - Diseños factoriales 3^k y 3^{k-p}
- Diseños de mezclas.
 - Diseño de lattice simples
 - Diseños simples con centroide

- Diseño con restricciones
- Diseño axial
- Diseños robustos
 - Diseños ortogonales
 - Diseños con arreglos interno y externo

En el presente trabajo se pretende identificar las variables que tienen influencia en las respuestas del reactor, por lo tanto, se seleccionó un diseño factorial 2^k con puntos centrales.

El diseño factorial sirve para estudiar el efecto individual y de interacción de varios factores sobre una o varias respuestas, generalmente se desea encontrar una combinación de niveles de los factores en la que el desempeño del proceso sea mejor, expresado mediante un modelo de respuesta (Gutierrez & Salazar, 2004).

La familia de diseños experimentales 2^k consiste en k factores, todos con dos niveles de pruebas (-1,1). Son útiles cuando el número de factores a estudiar está entre 2 y 5 (Gutierrez & Salazar, 2004). El número de experimentos a realizar con este tipo de DDE se define por 3-1.

$$N_e = 2^{k_e} + n_0 \quad 3-1$$

Dónde N_e corresponde al número de experimentos, k_e es el número de factores de diseño a estudiar y n_0 los puntos centrales.

De acuerdo con Tan et al. (2008), los puntos centrales son empleados para determinar el error experimental y la reproducibilidad de los datos. Este tipo de diseños permite obtener un modelo matemático de primer orden, describiendo una aproximación del comportamiento de la variable de respuesta en relación con los factores de diseño (Gutierrez & Salazar, 2004).

Entre las ventajas de utilizar experimentos factoriales se pueden mencionar:

- Los diseños pueden aumentarse para formar diseños compuestos en el caso de que se requiera una exploración más completa.
- Cuando el número de combinaciones de tratamientos es muy grande, se pueden utilizar fracciones del diseño factorial, que son muy útiles en las primeras etapas de una investigación.
- Estos diseños pueden combinarse con diseños por bloques, cuando hay restricciones en la aleatorización.
- El cálculo de los efectos en un diseño factorial es muy sencillo.

Aunque hay que mencionar que el utilizar estos diseños tiene también sus desventajas, entre las cuales se encuentran:

- A medida que se incrementa el número de factores o de niveles, el diseño factorial se hace impráctico, debido a las limitaciones de material experimental o recursos.
- Cuando aumenta el número de factores se dificulta la interpretación de interacciones de orden superior.

3.2 PRUEBA DE TRAZADORES.

La operación de los procesos utilizados durante la potabilización puede verse afectada por varios factores: baja eficiencia de la dispersión de los coagulantes en las unidades de mezcla rápida, tiempos más cortos de los requeridos en las unidades de floculación, menores volúmenes disponibles que los de diseño en los tanques de sedimentación y turbulencia excesiva en la zona de sedimentación (Levenspiel, 2004). De acuerdo con Giácoman et al. (2003), también influye en este tipo de sistemas la presencia de tres estados de la materia (sólido, líquido y gas) y la interacción entre estos.

Uno de los parámetros importantes que afectan el diseño de las unidades es la no idealidad. Los dos tipos de flujo que se consideran como ideales son el flujo pistón y la mezcla completa (Levenspiel, 2004). En el primero las propiedades no varían con el tiempo, es decir, las partículas entran y salen sin que exista una mezcla entre la corriente inmediata anterior o posterior, las partículas atraviesan la unidad a la misma velocidad por lo que no existe una distribución en el tiempo de residencia. En el segundo la composición de la corriente de salida es igual a la composición dentro de cualquier punto del reactor, lo que indica una mezcla instantánea de las partículas en el interior de este, esta composición no varía con el tiempo por lo que se considera en estado estacionario; es importante recalcar que en este caso todas las partículas tendrán diferentes tiempos de residencia hidráulica (TRH).

La necesidad de evaluar el funcionamiento hidráulico de las diferentes unidades de las plantas potabilizadoras, obligan al uso de técnicas que permitan conocer el tiempo de residencia de cada elemento del fluido dentro de la unidad. Una de estas técnicas es el método experimental estímulo – respuesta que se basa en el cálculo de la distribución de tiempos de residencia.

De acuerdo con lo reportado por Martín et al., (1999), en los sistemas reales cada elemento del fluido, en su paso por la unidad, puede tomar diferentes líneas de flujo o caminos, de manera que tendrán tiempos de residencia hidráulicos distintos entre sí, por lo tanto, su comportamiento a la salida del reactor tiende a una curva normal.

Si se considera que un fluido está constituido por una infinidad de elementos, los cuales están expuestos a diversas y variadas fuerzas de empuje y obstrucción al movimiento de estos, se puede asumir que cada elemento del fluido tiene un comportamiento definido dentro del sistema que determina su permanencia en el

mismo. Por lo tanto, cada elemento está relacionado directamente con su propia permanencia dentro del sistema y ello a su vez con el flujo completo en el sistema, lo que da lugar a la función de probabilidad del tiempo de residencia o lo que se conoce también como función de distribución del tiempo de residencia (Krizan, 1988).

Existen diversos modelos disponibles en los textos de ingeniería y reacciones químicas, para describir el tiempo de residencia (Levenspiel, 2004). Como regla general son modelos que intentan capturar el comportamiento imperfecto del fluido y lo traducen en parámetros como porcentaje de zonas muertas (M), porcentaje de cortos circuitos (n) y número de módulos conectados (N).

Las zonas muertas de las unidades representan el volumen de líquido que no se renueva constantemente en una unidad de tratamiento que trabaja en continuo, generalmente causado por problemas de diseño o acumulación de lodos entre otros. Por otro lado, los cortos circuitos son el volumen de líquido que sigue caminos preferenciales y sale de la unidad sin mezclarse completamente, con tiempos de residencia más cortos que los requeridos en la unidad de tratamiento. Finalmente, el número de módulos conectados representa el comportamiento de mezcla del sistema y que para un número N infinito de tanques agitados (con mezcla completa) describe el comportamiento hidráulico de un flujo en pistón y para N igual a uno, un flujo con mezcla completa.

A continuación se muestran algunas ecuaciones y definiciones utilizadas en el modelo propuesto por Martín et al., (1999) el cual se aplica en este trabajo; considerando un volumen (V) y un caudal (Q), se obtiene el tiempo de residencia hidráulico (τ), ecuación 3-2:

$$\tau = \frac{V}{Q} \quad 3-2$$

Suponiendo que se inyecta un trazador en forma instantánea (pulso) el tiempo de residencia medio se puede definir con 3-3:

$$\mu = \frac{\int_0^{\infty} tC(t)dt}{\int_0^{\infty} C(t)dt} \approx \frac{\sum tC(t)\Delta t}{\sum C(t)\Delta t} \quad 3-3$$

En la expresión anterior, t es el tiempo, $C(t)$ es la respuesta del sistema al estímulo inyectado y corresponde a la concentración medida a la salida de la unidad de tratamiento.

La función normalizada de la distribución del tiempo de residencia se denota como:

$$E(t) = \frac{C(t)}{\int_0^{\infty} C(t)dt} \quad 3-4$$

$$\int_0^{\infty} E(t) = 1 \quad 3-5$$

Donde, haciendo uso de la información recolectada, el denominador de 3-4, se aproxima como:

$$\int_0^{\infty} C(t)dt = \sum_{i=1}^{i_{max}-1} \left[\frac{C(t_{i+1}) + C(t_i)}{2} \right] (t_{i+1} - t_i) \quad 3-6$$

Lo anterior representa el área bajo la curva de distribución de los tiempos de residencia medidos. Para generalizar el tiempo de residencia (τ) y la función de distribución, Fernandez-Sempere et al., (1995) las convierte en adimensionales resultando las ecuaciones 3-7 y 3-8.

$$\theta = \frac{t}{\tau} \quad 3-7$$

$$E(\theta) = \tau E(t) \quad 3-8$$

Martín et al., (1999) aplican principios de balance de materia y técnicas de solución de la transformada de Laplace, un modelo de distribución de tiempos de residencia con estancamientos y cortos circuitos, para una adición de trazador instantáneo a la entrada de la unidad, con lo cual obtuvieron la expresión 3-9.

$$E(\theta) = \frac{Nn}{M} \sum_{i=1}^N \frac{N! e^{-nN\theta/M} (Nn\theta/M)^{i-1} (1-n)^{N-1} n^i}{(N-i)! i! (i-1)!} \quad 3-9$$

3.3 DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD)

La dinámica de fluidos computacional, CFD por sus siglas en inglés (*Computational Fluid Dynamics*), es una rama de la mecánica de fluidos que utiliza diferentes métodos numéricos y algoritmos para la resolución de las ecuaciones fundamentales, que permiten conocer de manera cualitativa y cuantitativa el comportamiento de los fluidos.

Al contar con un dispositivo que tiene dificultades ya sea en el diseño, construcción o costos, los programas de cómputo se convierten en una herramienta que permite llevar a cabo la experimentación de manera virtual, conociendo de esta manera el comportamiento interior del prototipo.

Las principales ventajas que presenta el uso de esta herramienta son:

- Predice las propiedades del fluido con gran detalle en el dominio estudiado.
- Ayuda a diseñar y encuentra soluciones iniciales evitando experimentos costosos.
- Se obtienen una visualización y animación del proceso en término de las variables del fluido.

Sin embargo, estas herramientas también tienen ciertas desventajas como son:

- Requerimiento de experiencia y formación especializada por parte del usuario.
- Consume altos recursos de *equipo y programa*.
- El esfuerzo computacional es elevado.
- La necesidad de información detallada para la modelación.

3.3.1 Metodología general de los CFD's

La metodología desarrollada para la modelación se basa en un esquema general que consta de: pre-proceso, proceso y pos-proceso.

El pre-proceso incluye todas las actividades y consideraciones relacionadas con la geometría y el desarrollo de la malla de análisis, en esta se definen las condiciones de frontera existentes y los materiales que intervienen.

En el proceso se consideran las actividades de selección de los modelos matemáticos a utilizar de acuerdo con el problema que se trate y la propia resolución de dichos modelos.

Finalmente, en el pos-procesamiento se consideran las actividades relacionadas a la visualización y análisis de los resultados obtenidos de acuerdo con las consideraciones tomadas en los procesos previos.

3.3.2 Modelo numérico Ansys Fluent ®

Ansys Fluent resuelve las ecuaciones de Navier-Stokes y continuidad. La principal ventaja de esta herramienta se encuentra en el tipo de mallado, ya que permite manipular la malla del modelo para reducir el esfuerzo computacional y mejorar la respuesta del modelo utilizando un mallado fino (estructurado o no estructurado) de acuerdo con la importancia de la escala considerada.

El programa provee capacidades de modelación para una amplia gama de problemas de flujos laminares y turbulentos en fluidos tanto compresibles como incompresibles, es capaz de analizar tanto flujo transitorio como establecido. Utiliza para la resolución del modelo el método de volúmenes finitos, el cual consiste en la integración de las ecuaciones gobernantes en los volúmenes de control, de manera que se obtienen ecuaciones discretas.

Para la resolución de cualquier tipo de fluido, resuelve las ecuaciones de continuidad y momento y adiciona otras ecuaciones de acuerdo con el fenómeno que se desee estudiar.

3.3.3 Modelación multifase

De acuerdo con la bibliografía (Sevilla-Padrón, 2012) en las simulaciones CFD de flujo gas-líquido existen tres modelos numéricos básicos: Método de volumen de fluido (VOF), método de escalas (LS) y trayectoria frontal (FT).

Se utiliza una modelación Euler-Euler, una aproximación continua que es la máxima escala de tiempo y espacio, donde ambas fases son resueltas por ecuaciones promediadas por fase y los efectos macroscópicos de interacciones entre fases es modelada por ecuaciones constitutivas. Puesto que este es el método más eficiente resulta el más utilizado. Otra ventaja es que, en lugar de limitar el flujo de la burbuja, puede ser utilizado para calcular cualquier régimen de flujo que se adecue a la relación de cierre sobre burbuja-burbuja y la interacción de burbuja-líquido conocidos. Aunque se requiera mayor esfuerzo computacional para el desarrollo de los modelos fenomenológicos de cierre para las fuerzas de burbuja, la turbulencia generada por la burbuja y la dinámica de la burbuja son consideradas, como la coalescencia y ruptura.

4 METODOLOGÍA

4.1 INTRODUCCIÓN

Durante los trabajos efectuados por Gelover et al. (2013), se cambiaron las configuraciones eléctricas e hidráulicas con la finalidad de optimizar las unidades de tratamiento. El sistema evolucionó de reactores cerrados, con problemas de acumulación de gas e incrementos de presión interna y pasivación, a un reactor abierto integrado por módulos en serie, que disminuye estos problemas y que se rige por la velocidad del flujo y la densidad de corriente.

Para dar continuidad a los trabajos efectuados para la remoción de sílice del agua de la central termoeléctrica de Salamanca (Gelover, et al., 2013), en este trabajo se revisan de manera integral cuatro variables geométricas y de operación (Ilustración 4-1) involucradas en el diseño de reactores de electrocoagulación abiertos de flujo vertical mixto.

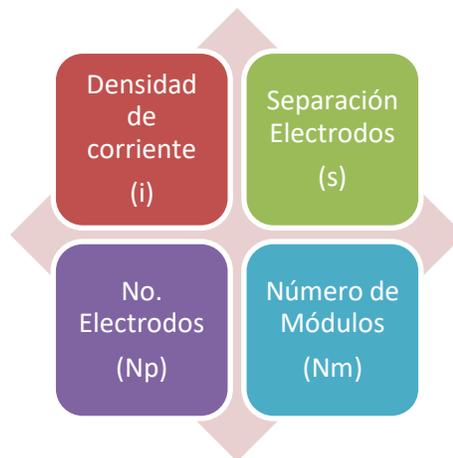


Ilustración 4-1 Variables electroquímicas e hidráulicas de diseño.

Para lo anterior se construyó un reactor en acrílico a escala semi-piloto, con el cual se utilizó un diseño de experimentos factorial 2^k para evaluar el comportamiento de las variables de estudio en la respuesta hidráulica y de operación del sistema. Una vez identificados los casos de estudio, estos se agruparon en bloques de acuerdo con la geometría del sistema, y posteriormente las pruebas de cada bloque se realizaron de manera aleatoria.

Previo a cada estudio se realizó una calibración hidráulica y eléctrica del sistema para tener las condiciones de referencia. Una vez efectuada la calibración, se revisó el comportamiento hidráulico del reactor para cada configuración establecida en el diseño de experimentos. Para esto se utilizaron pruebas de trazadores,

adicionando, en forma de pulso, una solución concentrada de cloruro de sodio a la entrada del piloto y midiendo los sólidos disueltos totales a la salida de este.

Posteriormente, durante el desarrollo de cada prueba del diseño, se obtuvieron imágenes de video en distintas zonas del modelo físico mediante una cámara de alta definición. Adicionalmente se modeló en el programa Ansys módulo Fluent, cada configuración probada en laboratorio, con la finalidad de conocer el comportamiento y velocidad del fluido en el interior del reactor, una vez planteada la matriz de análisis, se realizan las actividades de la Ilustración 4-2, la cual muestra el diagrama a realizar en el laboratorio.

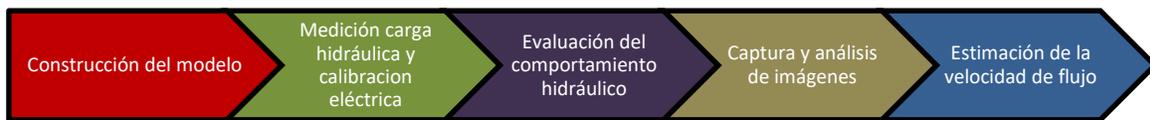


Ilustración 4-2 Diagrama de actividades

4.2 MODELO EXPERIMENTAL, EQUIPOS Y MATERIALES.

El prototipo utilizado para llevar a cabo la experimentación (Ilustración 4-4) fue el módulo de un reactor a flujo pistón mixto (ascendente-descendente), en el cual solo la zona ascendente contaba con electrodos de aluminio conectados en paralelo a una fuente de poder de corriente directa Sorensen DCS20/150E (Ilustración 4-3), con una salida de 150 A y 20V. La fuente de poder fijaba la corriente requerida para producir la dosis de aluminio de estudio, ajustando el voltaje de acuerdo con la resistencia del sistema al paso de la corriente.



Ilustración 4-3 Fuente de poder Sorensen 150 A /20 V.

La configuración del prototipo incluía un canal de entrada de agua (1), un canal de ascenso y reacción (Producción del AL^{+3} y H_2) donde se alojan los electrodos de aluminio (1.5 m de alto por 0.10 m de ancho y 0.00127 m de espesor) (2) y por último una zona de salida (3). La configuración del módulo varió dependiendo del espaciamiento y número de placas que se requiriera en cada ensayo. En cada prueba se utilizaron electrodos nuevos.

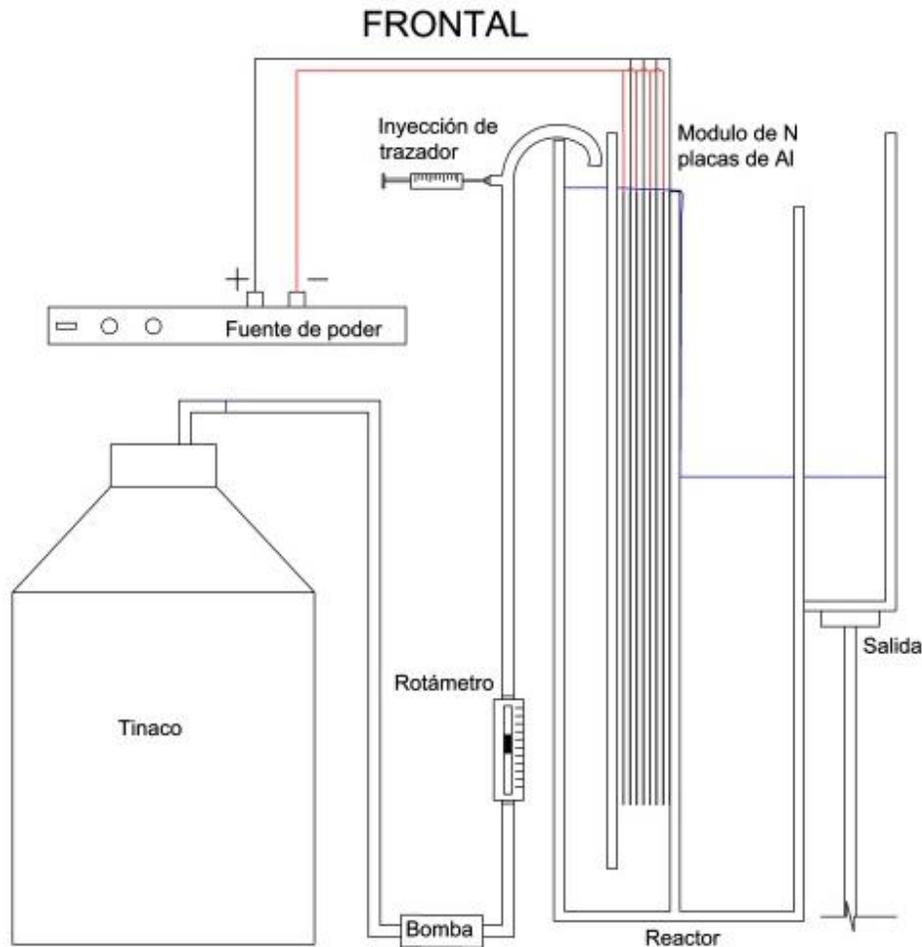


Ilustración 4-4 Esquema arreglo experimental.

El reactor utilizado constó de un solo módulo por la siguiente razón: en un reactor de electrocoagulación a flujo constante, con módulos conectados hidráulicamente en serie, cada uno de ellos cuenta con el mismo número de placas y la corriente eléctrica se distribuye proporcionalmente en todas ellas; esto asegura que la producción de aluminio en cada uno de los módulos sea la misma. En este tipo de configuración, el flujo se va enriqueciendo con el coagulante producido electroquímicamente a medida que pasa por los módulos y al final del reactor se alcanza la cantidad deseada de acuerdo con el tipo y concentración del contaminante que se desea eliminar. Analizando un solo módulo se pueden extrapolar los resultados al reactor completo.

El prototipo se construyó en acrílico de ocho milímetros de espesor con separadores y tapas móviles. La transparencia del acrílico permitió la captura de los videos en la zona de reacción, así como la visualización de las zonas de corto circuito y zonas muertas presentes en el modelo. El reactor se enmarcó con una estructura metálica, la cual facilitó las maniobras necesarias para la modificación de las distintas

configuraciones de estudio propuestas; también se reforzó con soleras de 1" y piezas de PTR (Ilustración 4-5), distribuidas para contrarrestar los efectos de flecha asociados a la carga hidrostática.

Otra función de este armado fue el minimizar las fugas internas que pudieran existir entre la tapa y las mamparas de acrílico. Finalmente se colocaron válvulas de 1" a la entrada, dos de 1 ½" y una de 1" a la salida del reactor y dos de ¼" en el fondo del reactor para desalojo del agua y flóculos acumulados.

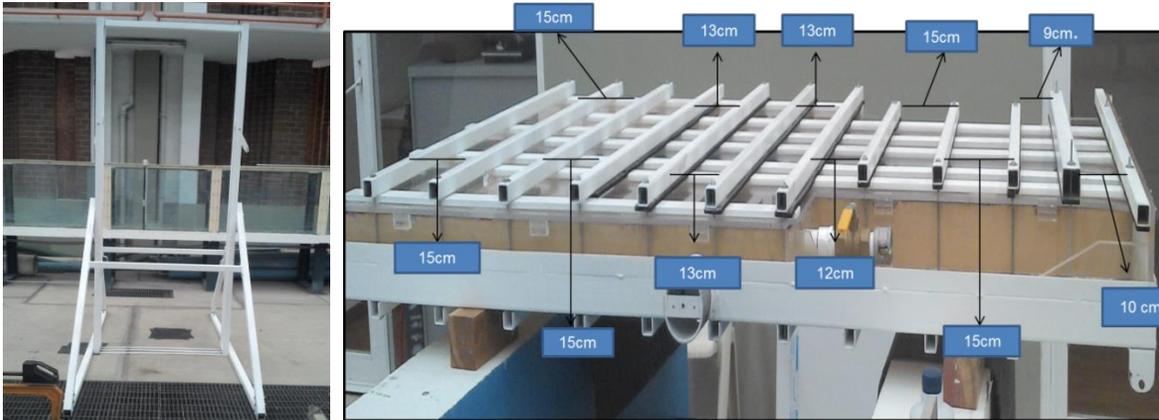


Ilustración 4-5 Refuerzo externo del modelo físico.

Se utilizó un contenedor con capacidad de 1100 litros para almacenar el agua sintética y una bomba de ¾" para el abastecimiento de esta última.

La conductividad se midió con un conductímetro portable 5star (Ilustración 4-6), con rango de medición de 0-5,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, resistividad de 0.0001 a 100 megaohmios, salinidad de 0.01-80.0 ppt NaCl, TDS de 0.0-19.900 mg/l y temperaturas de referencia de 15°C, 20°C o 25°C.



Ilustración 4-6 Conductímetro 5star

La medición del cloruro de sodio para la prueba de comportamiento hidráulico se realizó en una balanza analítica marca Sartorius modelo BL2105 (Ilustración 4-7).

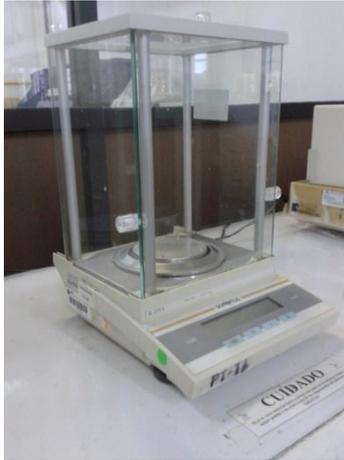


Ilustración 4-7 Balanza analítica

La medición del caudal se realizó con rotámetros (Ilustración 4-8) de 75 L/min y 35 L/min, dependiendo del flujo de cada prueba, colocados antes de la válvula de entrada del reactor.



Ilustración 4-8 Rotámetro Capacidad 75 l/min

Para la captura de videos se utilizó una cámara de alta velocidad para computadora de escritorio (Ilustración 4-9), MotionScope Monocromática, modelo PCI 8000 S (1990-1995 Versión 4.0), tripié y reflector 120 W. La recolección de las imágenes se realizó en el programa Motion Scope, propio de la cámara utilizada.



Ilustración 4-9 Cámara MotionScope monocromática.

Las imágenes capturadas tienen una resolución de 480 x 420 x 8 pixeles siendo estos el número de pixeles por lado que tendrá la imagen, la cámara realiza hasta 8000 cps que corresponde al número de imágenes capturadas por segundo y trabaja con una proporción de 3 x 4, es decir la relación ancho-alto de las imágenes capturadas.

4.3 DISEÑO DE EXPERIMENTOS

Se utilizó un diseño factorial 2^4 para estudiar los efectos principales y las interacciones entre los cuatro parámetros de diseño: densidad de corriente (i), separación entre electrodos (s), número de electrodos (N_p) y de módulos (N_m), sobre el tiempo de residencia del reactor (TRH), zonas muertas (ZM), cortos circuitos (CC), carga hidráulica (H) y voltaje del sistema. Las variables de estudio se analizaron a dos niveles (-1 y 1) como se muestra en la (Tabla 4-1). El total de experimentos fue de 19, incluyendo tres repeticiones en el punto central.

Tabla 4-1 Valores mínimo, máximo y centro del diseño de experimentos.

PARAMETRO	Código	-1	0	1
Densidad de corriente	i	20	40	60
Separación de Placas	s	0.006	0.0105	0.015
Número de placas por módulo	N_{pm}	3	6	8
Número de módulos	N_m	4	5	6

Los valores de las variables de estudio se explican a continuación.

En la bibliografía se presentan experimentaciones con la corriente en un rango de 5 A/m^2 a 260 A/m^2 , resultando que una corriente de $38 \pm 2 \text{ A/m}^2$ permite un adecuado consumo de los electrodos sin incrementar el voltaje suministrado al sistema por pasivación. Este valor se tomó como central de escalamiento para el planteamiento del diseño factorial.

Para el diseño de experimentos se consideraron cuatro y seis módulos como intervalo de trabajo, también partiendo de los resultados preliminares del estudio de referencia.

La separación de electrodos que se presenta en la bibliografía se encuentra entre 0.5 cm y 6 cm, para este trabajo se seleccionó un intervalo de 0.6 cm a 1.5 cm.

Por cuestiones físicas del reactor, el número de electrodos considerado por módulo se varió entre tres y ocho placas.

Una vez establecidas las variables de estudio, fue necesario fijar las variables de operación del sistema, las cuales están ligadas con las del diseño de experimentos de la siguiente manera:

- La densidad de corriente (i) está relacionada con la intensidad de corriente (I) y con el área total de reacción (A_r), que a su vez depende del número y área total de electrodos. Para este trabajo se establecieron las densidades de corriente y el número de electrodos como variables de diseño, por lo tanto, de la ecuación 2-1 se despeja la corriente que se utilizará en cada caso de estudio, resultando la 4-1:

$$I = iA_r \quad 4-1$$

- El caudal de tratamiento en el sistema depende de la corriente (I) y de la cantidad de coagulante (C_t) que se desea producir; en este caso se estableció una dosis teórica de 27 mg/L de aluminio total al final del reactor, partiendo del estudio de Gelover et al. (2013) que se enfoca a la remoción de sílice. Por lo tanto, de la expresión 2-2

y sabiendo que $Q = V/t$, se despeja Q y se obtiene:

$$Q = \frac{IPM}{C_t nF} \quad 4-2$$

- La conductividad de experimentación se estableció mediante la adición de cloruro de sodio (NaCl), entre 700 μ S/cm y 750 μ S/cm en los diferentes casos de estudio, también para simular el mismo tipo de agua del estudio de referencia mencionado.
- El reactor se compone de varios módulos de reacción (zonas de electrodos), por lo que la concentración teórica de aluminio se divide entre el número de módulos, para obtener la concentración teórica por módulo.

La Tabla 4-2 indica los valores de las variables de operación, para cada prueba del diseño de experimentos. Las variables de respuesta, como ya se mencionó anteriormente, fueron: tiempo de residencia del reactor (TRH), zonas muertas (ZM), cortos circuitos (CC), carga hidráulica (H) y voltaje del sistema.

Se utilizó el análisis de varianza (ANOVA) para la revisión estadística de los resultados, mediante el programa Statgraphics®, con lo que se evaluó la

significancia del modelo; así como la correlación de coeficientes (R^2) y la prueba F para la revisión de la calidad del modelo en términos estadísticos.

Tabla 4-2 Variables de diseño y operación para la experimentación.

CASE	<i>Variables independientes</i>				<i>Variables dependientes</i>			
	<i>i</i> (A/m ²)	<i>s</i> (m)	<i>N_{pm}</i>	<i>N_m</i>	<i>i</i> (A)	<i>Q</i> (l/min)	<i>C_m</i> (mg/l)	<i>τ</i> (min)
1	20	0.006	3	4	5.4	4.5	6.8	1.407
2	60	0.006	3	4	16.2	13.4	6.8	0.627
3	20	0.015	3	4	5.4	4.5	6.8	3.108
4	60	0.015	3	4	16.2	13.4	6.8	1.021
5	20	0.006	8	4	18.9	15.7	6.8	1.103
6	60	0.006	8	4	56.7	47.1	6.8	0.547
7	20	0.015	8	4	18.9	15.7	6.8	2.412
8	60	0.015	8	4	56.7	47.1	6.8	0.817
9	20	0.006	3	6	5.4	6.7	4.5	1.029
10	60	0.006	3	6	16.2	20.2	4.5	0.451
11	20	0.015	3	6	5.4	6.7	4.5	3.563
12	60	0.015	3	6	16.2	20.2	4.5	0.655
13	20	0.006	8	6	18.9	23.5	4.5	0.609
14	60	0.006	8	6	56.7	70.6	4.5	0.235
15	20	0.015	8	6	18.9	23.5	4.5	1.702
16	60	0.015	8	6	56.7	70.6	4.5	0.562
17	40	0.0105	6	5	27.0	28.0	5.4	0.687

4.4 CARGA HIDRÁULICA Y CALIBRACIÓN ELÉCTRICA

Para el caso de las pruebas en laboratorio, se determinó experimentalmente la pérdida de carga mediante la diferencia de altura del espejo de agua (Ilustración 4-10), tanto en presencia, como en ausencia de la reacción electroquímica y se obtuvo el coeficiente de descarga correspondiente (C_{dv}). La medición se realizó mediante flexómetros colocados en las tapas del prototipo.

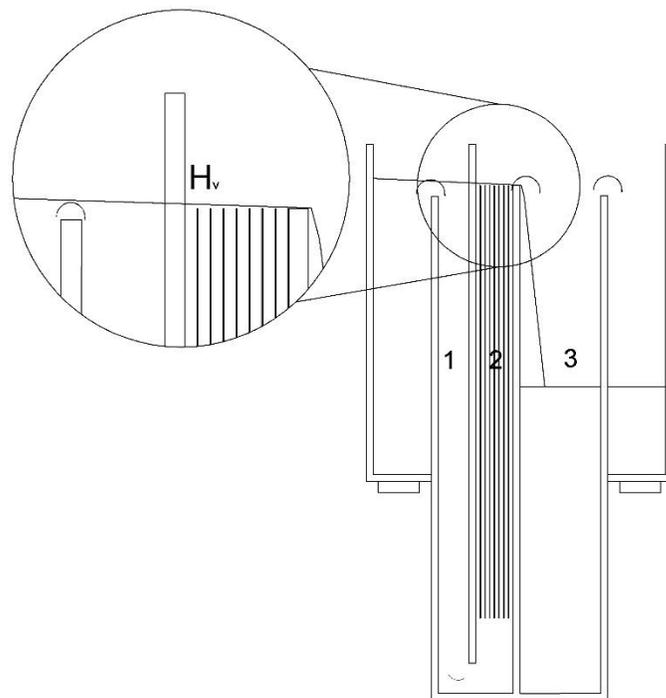


Ilustración 4-10 Esquema de la ubicación de las mediciones realizadas.

La calibración eléctrica consistió en la aplicación de una serie de valores de corriente y la determinación experimental del voltaje asociado a cada valor de corriente, para cada caso de estudio. El voltaje se leyó directamente de la fuente de poder utilizada.

4.5 EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO DEL REACTOR

Del modelo de trazadores mostrado en la ecuación 3-9, los parámetros de interés son M , n y N , los cuales se relacionan con las zonas muertas, cortos circuitos y el número de reactores en serie que mejor se adapta al comportamiento del flujo en el reactor. Los valores de estas variables se obtienen, de acuerdo con Martín et al (1999), de la siguiente manera:

- 1) Se estabiliza el flujo continuo dentro del sistema durante 15 o 20 minutos.
- 2) Se prepara una solución de cloruro de sodio (NaCl) como trazador, a una concentración tal, que se asegure un aumento de entre 50 y 60 unidades los Sólidos Disueltos Totales (SDT) en el agua de salida, con respecto al agua de entrada.
- 3) Se inyecta el trazador en forma de pulso en la válvula de entrada al reactor.
- 4) Se miden cada dos segundos los SDT a la salida del reactor.

- 5) Se grafican los datos recopilados, que corresponden a la curva de evolución $C(t)$.

La información recopilada se introduce en una aplicación programada en MS Excel VBA, la cual obtiene los valores de M, n y N, mediante la función Solver, que minimizan el error (ecuación 4-3) entre los datos experimentales y el modelo teórico (ecuación 3-9).

$$\varepsilon(M, n, N) = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{i_{max}} [E(\theta_i)_{experimental} - E(\theta_i)_{predicción}]^2}}{(i_{max} - 1)} \quad 4-3$$

Donde $E(\theta_i)_{experimental}$ corresponde a la curva experimental y $E(\theta_i)_{predicción}$ es la obtenida con el modelo matemático.

Una de las características de este desarrollo es que permite la exploración de diferentes valores de arranque para M, n y N, así que de manera indirecta revisa la sensibilidad de las variables.

4.6 CAPTURA Y ANÁLISIS DE IMÁGENES

Durante cada experimento se realizaron videos con duración de entre 4 y 8 segundos en las zonas superior, central e inferior del piloto, en las que a su vez se capturaron imágenes de la parte izquierda, centro y derecha, Ilustración 4-11.

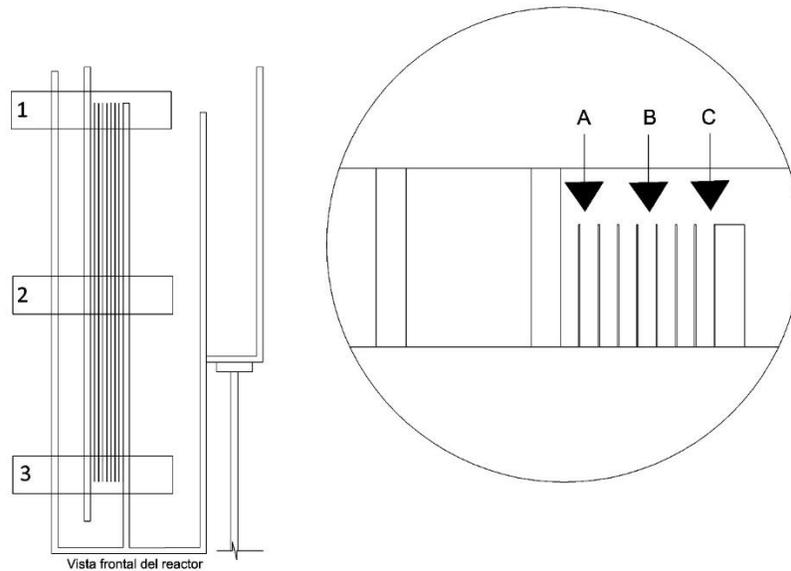


Ilustración 4-11 Esquema de las zonas de captura, Superior (1), Media (2), Inferior (3), Izquierda (A), Media (B) y Derecha (C).

Cada uno de los videos se utilizó para obtener los diámetros y la distribución de las burbujas presentes en el fenómeno electroquímico, mediante el programa ImageJ®, el cual permite la desagregación de los videos y la aplicación de filtros para el tratamiento de las imágenes y posterior cálculo de los diámetros.

4.7 ESTIMACIÓN DE LA VELOCIDAD DE FLUJO

Las simulaciones de las diferentes configuraciones del reactor estudiado en presencia y ausencia de gas se realizaron con el programa Ansys Fluent®; este programa resuelve de manera iterativa las ecuaciones de Navier-Stokes.

La Ilustración 4-12 muestra una de las geometrías (medio y placas) en dos dimensiones utilizadas para simplificar el tiempo de cálculo y la capacidad de máquina requerida para la modelación. Otra simplificación realizada, es que los electrodos estén pegados a las paredes laterales del reactor asegurando la ausencia de flujo en esa zona, aunque realmente en el prototipo de laboratorio no se puede impedir dicho flujo.

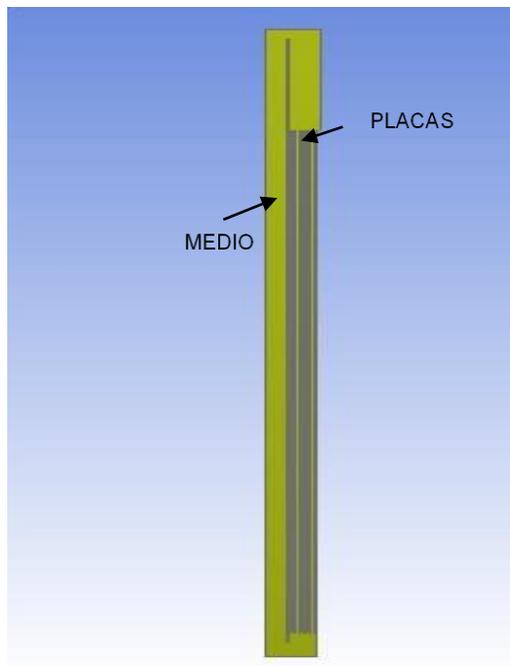


Ilustración 4-12 Geometría del reactor de electrocoagulación de la prueba ocho.

Se generó la malla correspondiente para cada caso (Ilustración 4-13) ya que esta depende primeramente de la separación de los electrodos, posteriormente se revisaron variaciones para estabilizar el cálculo y reducir el esfuerzo computacional, se trabajó con un tamaño mínimo de $1e-03$ m, una tasa de crecimiento de 1.2 y 0.01 como tamaño máximo de cara para los elementos, con la finalidad de que se

consideren las placas de electrocoagulación en la geometría, y el error por discretización también sea reducido.

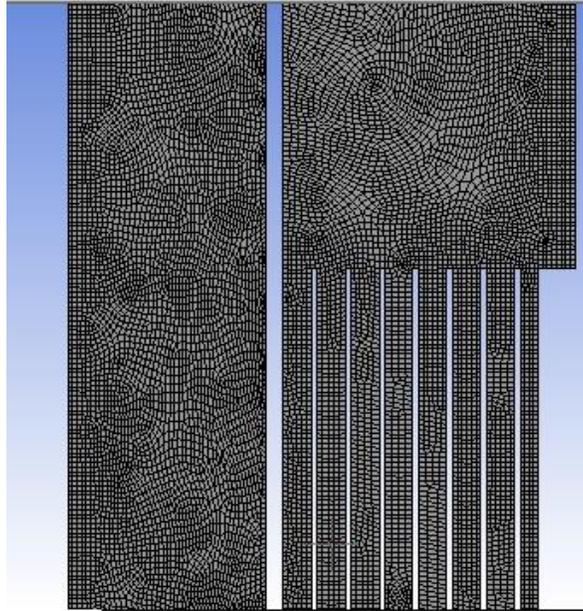


Ilustración 4-13 Ejemplo de mallado de cálculo para el modelo.

Finalmente se designaron las condiciones iniciales o de frontera (Ilustración 4-14), que para cada caso fueron el caudal de entrada (mass_flow_inlet) de la Tabla 4-2, y a la salida (pressure_outlet), el valor de la presión relativa se consideró cero. Lo anterior significa que la presión del sistema en ese punto es igual a la presión atmosférica y se selecciona la opción de transferencia de masa y momento.

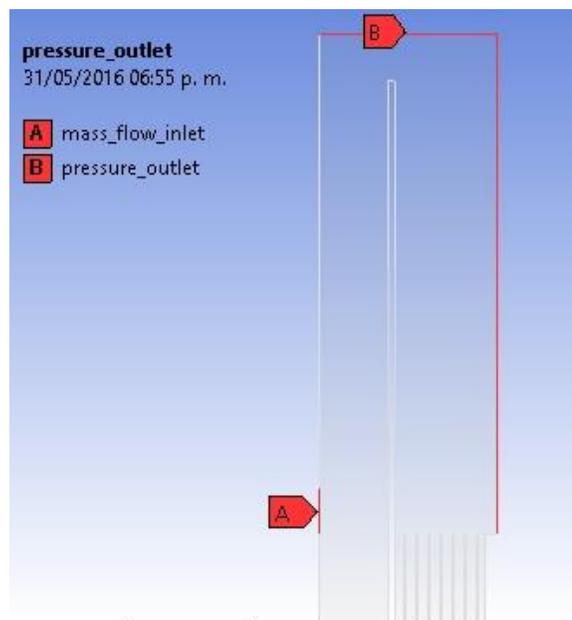


Ilustración 4-14 Condiciones de frontera utilizadas en la modelación.

Las propiedades del sistema en CFD, para este caso, se definieron como: a) agua e hidrógeno en el seno del reactor y b) aire en la superficie libre del reactor. Los datos introducidos al sistema fueron agua líquida (densidad de 998.2 kg/m³ y viscosidad de 0.001003 kg/ms), hidrógeno (densidad de 9.3 kg/m³ y viscosidad de 1e-5 kg/ms) y aire (densidad de 1.225 kg/m³ y viscosidad de 1.7894e-5 kg/ms).

La modelación se consideró basada en presiones, por lo que las variables de momento y presión son las principales y el programa las resuelve de manera simultánea o secuencial. Este tipo de resolución se aplica a un amplio rango de flujos, que van de aquellos incompresibles con baja velocidad, a flujos compresibles de alta velocidad.

Para el cálculo se utilizó un modelo PRESTO (PREssure STaggering Option) implícito de primer orden, con un modelo de turbulencia k-ε. La modelación se realizó con un modelo bifásico (agua, aire), al cual se le agrega la presencia del hidrógeno en forma de burbuja.

Los parámetros importantes de las simulaciones fueron las velocidades y las líneas de flujo a lo largo del reactor, tanto para el agua como para el hidrógeno generado por la electrólisis.

4.8 ECUACIÓN PARA DISEÑO DE REACTORES

Con la finalidad de establecer un método de diseño para los reactores de electrocoagulación del tipo investigado en este estudio, se acoplaron las ecuaciones que describen el comportamiento hidráulico y electroquímico de acuerdo con las características de diseño y operación.

4.8.1 Acoplamiento de ecuaciones

En un sistema de electrocoagulación, el primer paso es fijar la cantidad de coagulante requerido, en función del contaminante a remover y de su concentración en el agua problema. Se parte de la ley de Faraday (4-4) para el cálculo de la dosis de coagulante y se despeja la corriente eléctrica, obteniendo la expresión 4-5.

$$m = \frac{It}{nF} \quad 4-4$$

$$I = \frac{mnF}{t} \quad 4-5$$

Dónde m son los moles de metal oxidado en los electrodos (mol), I es la cantidad de corriente aplicada al sistema [ampere (coulomb/s)], F es la constante de Faraday

(96,500 coulomb/mol), n es el número de electrones transferidos por mol de sustancia transformada y t es el tiempo de aplicación de la corriente (s).

Para calcular la concentración del coagulante, ecuación 4-6, C_T (g/L) se utiliza el peso molecular PM del metal involucrado y el volumen V_R (L) del reactor:

$$C_T = \frac{m PM}{V_R} \quad 4-6$$

Lo que sustituyendo en la ecuación 4-5 queda finalmente:

$$I = \frac{C_T V_R n F}{PM t} \quad 4-7$$

La anterior es una expresión donde la corriente depende de la concentración del coagulante deseado y del volumen de estudio, para reactores en batch. Para flujo continuo se puede hacer uso de la definición de caudal, $Q = \text{volumen/tiempo}$, y la expresión 4-7, puede reescribirse como:

$$I = \frac{C_T Q n F}{PM} \quad 4-8$$

Para el cálculo del caudal en el sistema, se tomó como base la ecuación de caudal en orificios ahogados (4-9); la cual es función de un coeficiente de descarga, C_d igual a 0.60, debido a que la descarga es a 90° y la relación apertura de la descarga y altura de carga es mayor a 10, la sección transversal del orificio, A_f , y la raíz de dos veces la aceleración gravitacional, g , por la diferencial de carga, ΔH .

$$Q = C_d A_f \sqrt{2g\Delta H} \quad 4-9$$

El área de la sección resulta del producto de la separación de las placas, s , por el número de placas N_p y el ancho del reactor, b , por lo tanto, se tiene:

$$A_f = b N_p s \quad 4-10$$

Con las ecuaciones, 4-8, 4-9 y 4-10 se despeja C_T y se obtiene una expresión en función de la corriente suministrada, la geometría del reactor y la pérdida de carga hidráulica:

$$C_T = \frac{IPM}{n F C_d b N_p s \sqrt{2g\Delta H}} \quad 4-11$$

Utilizando la definición de densidad de corriente:

$$i = \frac{I}{A_R} \quad 4-12$$

Dónde A_R es el área de reacción, es decir, el área total de electrodos correspondiente al ánodo y que se calcula como:

$$A_R = bL(N_p - 1)N_m \quad 4-13$$

Donde b es el ancho de placas (m), L la altura de placas (m), N_p el número de placas y N_m es el número de módulos que conforman al reactor. En este punto se considera que todos los módulos son iguales y por lo tanto el número de placas en cada uno de ellos es el mismo. También es importante señalar que, por el tipo de reactor estudiado, los módulos operan en serie, y, por lo tanto, todo el flujo pasa por cada uno de ellos.

Sustituyendo las ecuaciones 4-13 y 4-14 en la 4-12, se obtiene:

$$C_T = \frac{iPML(N_p - 1)N_m}{nFC_dN_pS\sqrt{2g\Delta H}} \quad 4-14$$

Donde ΔH corresponde a las pérdidas de energía en el reactor (4-15) y pueden entenderse como la diferencia entre la carga inicial (entrada del reactor) H_T y la carga del vertedor a la salida del reactor H_v .

$$\Delta H = H_T - H_v \quad 4-15$$

Por otro lado, para el cálculo del voltaje requerido para fijar la corriente eléctrica de diseño, se utiliza la ley de ohm, la cual se presenta en la expresión 4-16.

$$V_{elec} = IR_S \quad 4-16$$

Dónde, V_{elec} es el voltaje (V), I es la corriente (A) y R_S es la resistencia al paso de la corriente (Ohm)

Dentro del reactor el electrolito ofrece una resistencia óhmica al paso de la corriente, la cual está en función de su conductividad. También opone resistencia la distancia entre los electrodos, su geometría y material, así como la distancia y material de los cables conectores. Considerando todos estos factores, el voltaje, o caída de potencial eléctrico se puede calcular de la siguiente manera:

$$V_{elec} = \frac{i s}{S_{H_2O}} + R_{mat} * Lc * I \quad 4-17$$

Donde, R_{mat} es la resistividad del cable conductor (ohm/m) y Lc es la longitud total de cables conductores (m)

Si solamente se considera la resistencia dentro del reactor sin considerar los cables conductores, al despejar la separación (s) del primer término de la expresión 4-17, sustituir el resultado en la 4-14 y despejar V_{elec} , se obtiene la ecuación:

$$V_{elec} = \frac{i^2 P M L (N_p - 1) N_m}{n F C_d N_p \sqrt{2g(H_T - H_v)} C_T S_{H_2O}} \quad 4-18$$

Una vez definida la ecuación para el sistema, es necesario revisar la homogeneidad de las unidades de las variables que en ella intervienen, por lo que se revisan las unidades fundamentales de cada variable, la Tabla 4-3, muestra las unidades fundamentales de las variables.

Tabla 4-3 Unidades fundamentales de las variables.

Variables	Unidades
F	AN ⁻¹
i	A L ⁻²
H	L
Ct	M L ⁻³
A _r	L ²
A _f	L ²
G	LT ⁻²
S _{H2O}	A ² T ³ M ⁻¹ L ⁻³
V _{elec}	M L ² A ⁻¹ T ⁻³
PM	M N ⁻¹

Sustituyendo las unidades de la tabla en la expresión 4-18, se obtiene:

$$V_{elec} = \frac{[A L^{-2}]^2 [M N^{-1}] [L]}{[A N^{-1}] \sqrt{[L T^{-2}] [L]} [T^3 A^2 L^{-3} M^{-1}] [M L^{-3}]}$$

Simplificando el lado derecho de la ecuación, se obtiene que:

$$V_{elec} = [M L^2 T^{-3} A^{-1}]$$

Con la finalidad de anexar los fenómenos presentes en la zona de reacción de cada módulo, se considera que el número de módulos del reactor se relaciona con las pérdidas de carga debidas a la fricción de las placas. Para lo anterior, se considera la expresión 4-19.

$$h_t = N_m h_f \quad 4-19$$

De la definición de gradiente de velocidad (G), ecuación 4-20, se despeja la pérdida de carga (h_f), que corresponde a las pérdidas por fricción.

$$G = \sqrt{\frac{\gamma h_f}{\mu \tau}} \quad 4-20$$

Donde γ corresponde al peso específico del agua en (N/m³), μ es la viscosidad dinámica del agua (kg/ms), h_t la pérdida de carga del módulo y τ_R es el tiempo de residencia hidráulico en segundos en la zona de reacción.

$$h_f = \frac{G^2 \mu \tau_R}{\gamma} \quad 4-21$$

El tiempo de residencia hidráulico es la relación entre un volumen y el caudal que circula por ese volumen, de lo anterior, se considera únicamente el volumen de la zona de reacción (V_{ZR}) y se divide entre el caudal del sistema (Q), con lo que se tiene:

$$h_f = \frac{G^2 \mu V_{ZR}}{\gamma Q} \quad 4-22$$

De la expresión 4-22 se considera el volumen (V_{ZR}) como la resta del volumen de gas generado por efecto de la reacción electroquímica al volumen de agua en la zona de reacción:

$$h_f = \frac{G^2 \mu N_m (V_{lZR} - V_{gZR})}{\gamma Q} \quad 4-23$$

El volumen de líquido (V_{lZR}) ocupado en la zona de reacción, puede calcularse con 4-24:

$$V_{lZR} = LN \rho s \quad 4-24$$

Para el cálculo del volumen de gas se parte de la Ley General de los Gases, 4-25.

$$V_{gZR} = \frac{m_i RT}{P} \quad 4-25$$

Dónde, V_{gZR} es el volumen del gas por módulo (m³), m_i es la masa molar del elemento (mol), R es la constante de los gases 8.205746×10^{-5} (atmm³mol⁻¹K⁻¹), T es la temperatura (K) y P es la presión del medio (atm).

Los moles de hidrógeno que se genera en el proceso pueden calcularse con la 4-4 (Ecuación de Faraday), considerando que por cada mol de Al⁺³ que se producen 3/2 de moles de H₂ por el paso de la corriente. Si esto se sustituye en la 4-25, se obtiene la expresión 4-26, que calcula el caudal de gas generado por electrólisis.

$$V_{gZR} = \frac{k_{H_2} I R T t_m}{n P F} \quad 4-26$$

Donde, K_{H_2} es la constante de generación por estequiometría de hidrógeno, y t es el tiempo de residencia hidráulico por módulo del hidrógeno, por lo que se definirá como (t_m).

$$t_m = \frac{V_{mZR}}{Q} \quad 4-27$$

Considerando la misma hipótesis utilizada en la ecuación 4-23, el tiempo de residencia en la zona de reacción se calcula como:

$$t_m = \frac{(\forall_{l_zr} - \forall_{g_zr})}{vbsN_p} \quad 4-28$$

Al sustituir la expresión 4-28 en la 4-26, se tiene.

$$\forall_{g_zr} = \frac{k_{H_2}IRT}{nPF} \frac{(\forall_{l_zr} - \forall_{g_zr})}{vbsN_p} \quad 4-29$$

Despejando \forall_{g_m} de la expresión anterior, se obtiene:

$$\forall_{g_zr} = \frac{iN_psb^2L^2(N_p - 1)k_{H_2}RT}{nPFvbsN_p + ibL(N_p - 1)k_{H_2}RT} \quad 4-30$$

Despejando G de la ecuación 4-194-23 y sustituyendo en esta en la 4-23, 4-24 y la 4-30, se obtiene la ecuación 4-31 :

$$G = \left(\frac{\gamma Q h_t}{Nm\mu (bLsN_p)} * \left[\frac{nFPvbsN_p + ibL(N_p - 1)k_{H_2}RT}{nPFvsN_p} \right]^{1/2} \right) \quad 4-31$$

Con la expresión 4-18, se realiza el diseño global del reactor de electrocoagulación, es decir la geometría tanto del módulo como la distribución de la zona reactiva, mientras que con la expresión 4-31, se obtiene información referente a la velocidad, diámetro de burbuja y gradiente en la zona de reacción. Tamaño y número de burbujas

De la 4-30, que corresponde al gas generado por módulo, se considera que este se desprende en burbujas completamente esféricas con radio medio r_b y en una cantidad N_b , por lo que el volumen puede escribirse como:

$$\forall_{g_m} = \frac{4\pi r_b^3}{3} N_b \quad 4-32$$

Con lo que sustituyendo la 4-33 en la 4-30 y despejando el número de burbujas (N_b) se obtiene:

$$N_b = \left(\frac{3}{4\pi r_b^3} \right) \left[\frac{iN_psb^2L^2(N_p - 1)k_{H_2}RT}{nPFvbsN_p + ibL(N_p - 1)k_{H_2}RT} \right] \quad 4-33$$

Finalmente, con los diámetros medios de burbuja, se calcula la velocidad límite de ascenso en el medio, la cual está dada por la ley de Stokes (4-34):

$$v_g = \frac{2gr_b^2(\rho_l - \rho_g)}{9\nu} \quad 4-34$$

Con la anterior y la velocidad del flujo, es posible incluir el diámetro medio de burbuja, y el número de burbujas esperado en el sistema.

Finalmente, la expresión 4-18 se resuelve mediante métodos de optimización multiparamétrica. Para este trabajo, se preparó una hoja de Excel que resuelve la ecuación por el método Evolutionary propio del programa.

5 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para analizar el efecto de los cuatro parámetros en las variables de respuesta se utilizó el diseño factorial. Para lo cual se definen las variables de acuerdo con los modelos de regresión con el subíndice aj con la finalidad de diferenciarlos de los valores obtenidos por la ecuación, resultando Voltaje (Vol_{aj}), concentración de coagulante (Ct_{aj}), zonas muertas (ZM_{aj}), cortos circuitos (CC_{aj}), tiempo de residencia sin gas (SG) y con gas (CG) μ_{aj} y carga hidráulica del vertedor H_{vaj} , excluyendo los términos no significativos y atípicos.

La significancia y adecuación del modelo se determinó por medio del Análisis de Varianza (ANOVA). Para cada variable de respuesta se muestra la tabla resumen. La relación de varianza de Fisher (Valor-P), es una medida estadística válida utilizada para describir la variación de los datos con respecto a la media (Tak, et al., 2005). Los valores debajo de 0.05 se consideran como términos significativos; aquellos términos que no fueron significativos y cuyo valor de P fuera mayor a 0.7 y los valores atípicos se eliminaron, con la finalidad de mejorar la calidad del modelo de regresión.

Por valores atípicos se considerarán aquellas observaciones cuyos valores son diferentes a las observaciones del mismo grupo de datos. Estos valores se eliminan del análisis debido a que distorsionan los resultados de estos.

Se analizaron las diferentes respuestas y se obtuvieron la R^2 y la R^2 ajustada (R^2_a), así como los efectos significativos y los resultados atípicos. La Tabla 5-1, muestra el resumen de resultados. En esta se puede observar un buen ajuste del modelo de cada una de las respuestas.

Tabla 5-1 resumen de resultados del análisis de respuestas sin considerar los centros

Respuesta	R^2	R^2_a	Significativos
Voltaje	95.9270	89.1387	i, s, s*i, Np*i
Eficiencia Voltaje	96.3465	91.1273	s*Np, s, Np, Np*i, Nm*i, Nmm*Np, s*i
Coagulante	84.5229	75.2414	Np, Nm, Nm*i
Eficiencia Coagulante	81.2691	62.5382	Np, Nm*i
Carga	85.4406	76.1756	i, Np, Np*i, Nm*i
ZM	84.0245	69.824	s, s*i, i
CC	83.5394	70.7368	s*Np, Np, i, Nm, Nm*i
TRH	96.6549	92.4735	i, s, s*i, Nm, Np

A continuación, se presenta los resultados con mayor detalle para cada una de las respuestas obtenidas.

5.1 VOLTAJE DEL SISTEMA

La Tabla 5-2, muestra los valores experimentales (V_R) obtenidos en el laboratorio, y teóricos (V_{sis}) de acuerdo con la ley de Ohm para el voltaje del sistema correspondiente a la matriz del diseño de experimentos.

Tabla 5-2 Comparación voltaje real contra voltaje teórico.

CASO	i	s	Np	Nm	V_R (V)	V_{sis} (V)	DIF
1	20	0.006	3	4	3.63	2.942	0.688
2	60	0.006	3	4	5.1	6.226	1.126
3	20	0.015	3	4	5.7	5.34	0.358
4	60	0.015	3	4	14.3	13.43	0.874
5	20	0.006	8	4	4.4	3.05	1.353
6	60	0.006	8	4	9.45	6.54	2.909
7	20	0.015	8	4	3.9	5.447	1.547
8	60	0.015	8	4	12.1	13.741	1.641
9	20	0.006	3	6	5.4	2.942	2.458
10	60	0.006	3	6	5.1	6.226	1.126
11	20	0.015	3	6	5.3	5.34	0.042
12	60	0.015	3	6	15.5	13.43	2.074
13	20	0.006	8	6	4.28	3.05	1.233
14	60	0.006	8	6	12.1	6.54	5.559
15	20	0.015	8	6	3.75	5.447	1.697
16	60	0.015	8	6	17.4	13.741	3.659

La Ilustración 5-1 indica que las variables de mayor significancia con respecto al voltaje real, de acuerdo al orden de impacto, son: la densidad de corriente (i), la separación de placas (s), la interacción de estas dos y la interacción del número de placas (Np) con la densidad de corriente (i), la cuales afectan de manera positiva al voltaje.

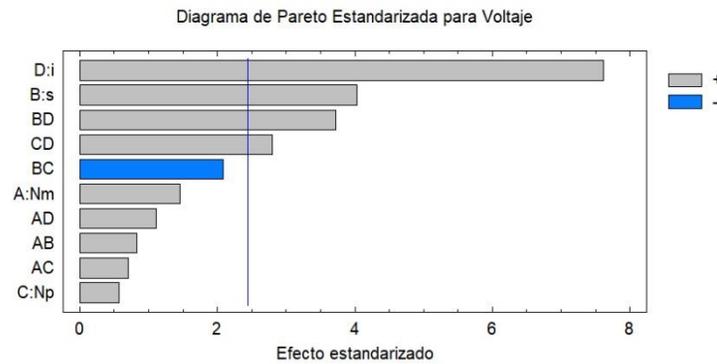


Ilustración 5-1 Gráfico de probabilidad normal para el voltaje.

La Tabla 5-3, muestra el resumen del ANOVA, donde se presentan las variables significativas con valores de 0.0003 para la densidad de corriente, 0.0069 para la separación, 0.0098 para la interacción entre estas y 0.0314 la interacción entre el número de placas y la densidad de corriente, confirmando que la densidad de corriente es la variable de mayor impacto para el aumento del voltaje en el sistema.

Tabla 5-3 Resumen de ANOVA para el voltaje

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A: Nm	4.48935	1	4.48935	2.14	0.1941
B: s	34.1294	1	34.1294	16.24	0.0069
C: Np	0.675516	1	0.675516	0.32	0.5913
D: i	121.959	1	121.959	58.04	0.0003
AB	1.44995	1	1.44995	0.69	0.4380
AC	1.03335	1	1.03335	0.49	0.5094
AD	2.6136	1	2.6136	1.24	0.3074
BC	9.10202	1	9.10202	4.33	0.0826
BD	29.2163	1	29.2163	13.90	0.0098
CD	16.4181	1	16.4181	7.81	0.0314
Error total	12.6081	6	2.10135		
Total (corr.)	309.554	16			

La Ilustración 5-2 muestra el efecto de la interacción identificada en el diagrama de Pareto como significativa, con valores constantes para el número de módulos y el número de placas (cinco y seis respectivamente). La gráfica sugiere que la caída de voltaje es influenciada de mayor manera por la densidad de corriente, cuando la separación entre las placas aumenta.

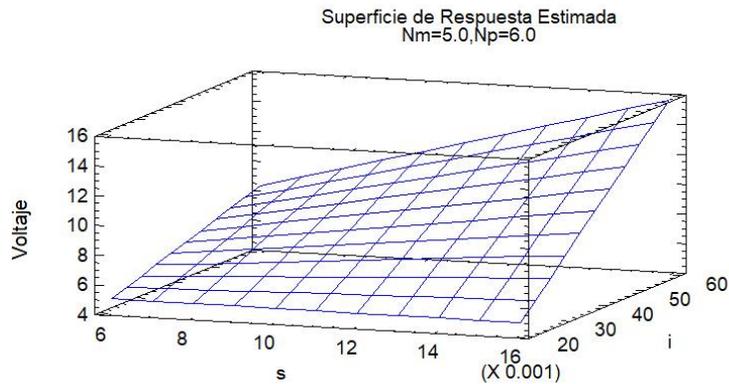


Ilustración 5-2 Interacciones de separación de placas y densidad de corriente en la caída del voltaje.

La Ilustración 5-3, muestra el comportamiento del voltaje con respecto a la variación del número de placas del sistema y la densidad de corriente, se puede observar que el efecto de este último aumenta cuando el número de placas aumenta. Por otro lado, el aumento del número de placas reduce el voltaje presente en el sistema.

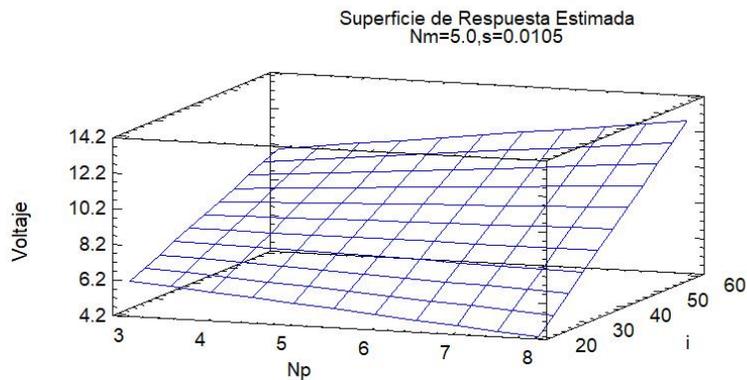


Ilustración 5-3 Interacciones de número de placas y densidad de corriente en la caída del voltaje

El modelo de regresión lineal para la función de respuesta se muestra en la ecuación 5-1, donde Vol_{aj} representa la caída del voltaje del sistema, N_p , i y s son el número de placas, densidad de corriente y la separación de los electrodos, respectivamente, excluyendo las variables atípicas y no significativas.

$$\begin{aligned}
 Vol_{aj} = & 14.5411 - 1.83379Nm - 271.105s - 0.597408Np \\
 & - 0.286224i + 76.9321Nms + 0.1245NmNp \\
 & + 0.02475Nmi - 82.1111sNp + 18.3889si \\
 & + 0.0232989Npi
 \end{aligned}
 \tag{5-1}$$

La calidad y ajuste del modelo se evalúa con el coeficiente de correlación (R^2), que mide la proporción de variación con respecto a la media de acuerdo con el modelo, mientras que la R^2 predicha es una medida del modelo para predecir el valor de respuesta.

El ajuste valor de R^2 del modelo de regresión para el voltaje es de 95.927 y la R^2 ajustada de 89.1387; arriba del 80% indica que la información o el modelo son confiables (Mook, et al., in press).

La Ilustración 5-4, muestra la distribución de los resultados observados contra los predichos y se puede observar que el modelo se ajusta adecuadamente a los resultados del sistema.

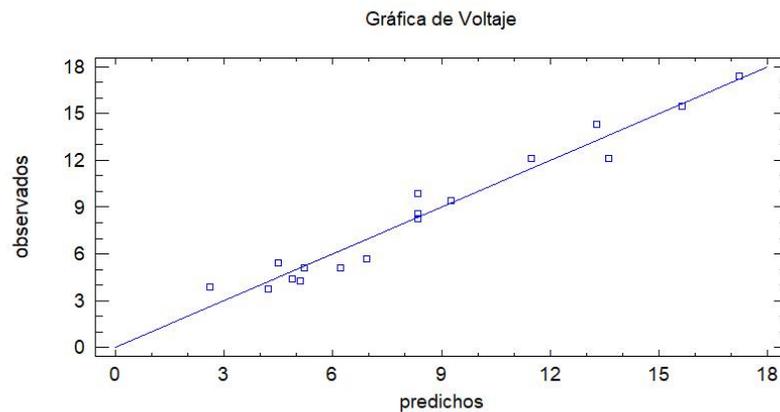


Ilustración 5-4 Gráfico de diagnóstico para la caída de voltaje.

5.1.1 Eficiencia de voltaje

El voltaje real fue comparado con el voltaje teórico esperado, con la finalidad de obtener la eficiencia voltaica del sistema, los valores de eficiencia se encuentran en la última columna de la Tabla 5-2. La Ilustración 5-5, muestra que las variables significativas para la eficiencia de voltaje es la interacción ente el número de placas y la separación entre ellas, seguido de sus efectos por separado. Así mismo son significativas en menor medida las interacciones de número de placas y la densidad de corriente, y el número de módulos con la densidad de corriente y número de placas.

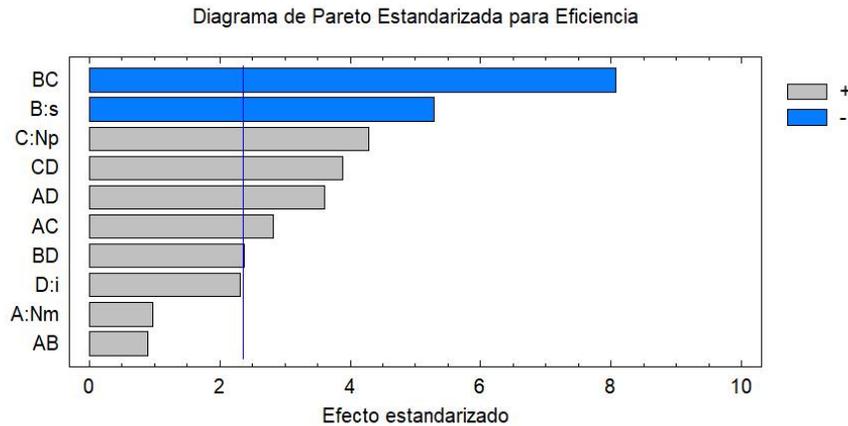


Ilustración 5-5 Diagrama de Pareto para la eficiencia de voltaje

La Tabla 5-4, muestra el resumen ANOVA para la eficiencia de voltaje, la separación de placas tiene un valor de P igual a 0.0011 y el número de placas de 0.0037, mientras que las interacciones tienen valores de 0.0255, 0.0087, 0.0001, 0.0494 y 0.0006. El valor de la R² del ANOVA resultó en 96.3465, mientras que las R² ajustada tiene un valor de 91.1273 por ciento.

Tabla 5-4 Resumen ANOVA para la eficiencia de voltaje

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A: Nm	72.6162	1	72.6162	0.94	0.3647
B: s	2159.27	1	2159.27	27.94	0.0011
C: Np	1415.16	1	1415.16	18.31	0.0037
D: i	411.328	1	411.328	5.32	0.0544
AB	62.9989	1	62.9989	0.82	0.3966
AC	617.675	1	617.675	7.99	0.0255
AD	1005.58	1	1005.58	13.01	0.0087
BC	5045.1	1	5045.1	65.27	0.0001
BD	435.371	1	435.371	5.63	0.0494
CD	1164.44	1	1164.44	15.06	0.0060
Error total	541.063	7	77.2948		
Total (corr.)	14809.6	17			

La ecuación 5-2, corresponde al modelo de ajuste para el cálculo de la eficiencia de voltaje, eliminando las variables no significativas.

$$\begin{aligned}
 \eta_V = & 249.103 - 35.0232Nm + 1724.23s + 1.19179Np \\
 & - 3.58213i + 482.249Nms + 2.71805NmNp \\
 & + 0.433506Nmi - 1726.23sNp + 63.3876si \\
 & + 0.186598Npi
 \end{aligned}
 \tag{5-2}$$

De acuerdo con la Ilustración 5-6, la eficiencia de voltaje mejora con la menor separación y mayor número de placas, en el valor máximo de separación la eficiencia se mejora reduciendo el número de placas.

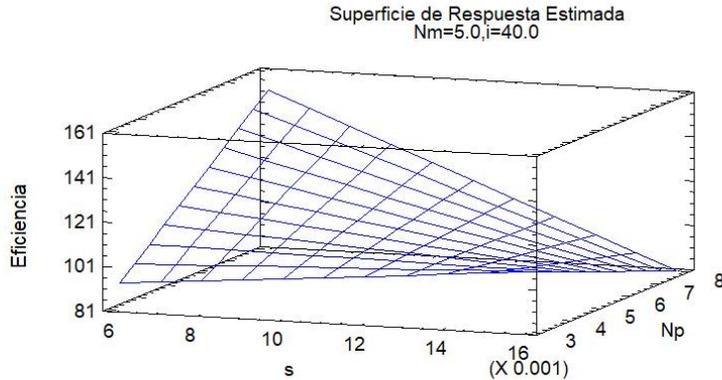


Ilustración 5-6 Superficie de respuesta para la relación separación y número de placas.

La Ilustración 5-7, muestra el comportamiento de la eficiencia de voltaje para las variables de número de módulos y densidad de corriente, se puede observar que la mejora se presenta al aumentar ambas variables.

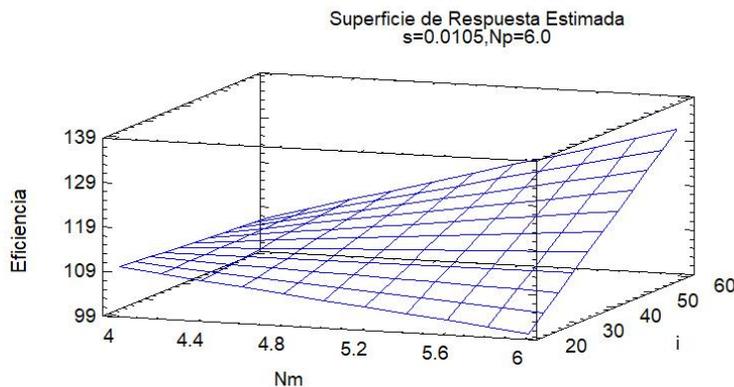


Ilustración 5-7 Superficie de respuesta para la eficiencia de voltaje, relación densidad de corriente número de módulos.

5.2 CONCENTRACIÓN COAGULANTE

La concentración de aluminio generado fue medida de manera indirecta con técnicas hatch. La Tabla 5-5, muestra las concentraciones teóricas por módulo (C_m)

según la ecuación de Faraday, así como los resultados obtenidos en el laboratorio (C_R) y la eficiencia en la generación del coagulante (E).

Tabla 5-5 Concentración de aluminio teórico, real y eficiencia de coagulante.

CASO	Q (l/min)	C_m (mg/l)	C_R (mg/l)	E (%)
1	4.5	6.75	8.44	125
2	13.4	6.75	13.58	201
3	4.5	6.75	10.5	156
4	13.4	6.75	12	178
5	15.7	6.75	7.2	106
6	47.0	6.75	9.7	144
7	15.7	6.75	7.3	107
8	47.0	6.75	8.4	150
9	6.7	4.5	11.52	256
10	20.1	4.5	7.8	173
11	6.7	4.5	5.05	112
12	20.1	4.5	7.77	173
13	23.5	4.5	6.075	135
14	70.5	4.5	4.76	106
15	23.5	4.5	6.7	149
16	70.5	4.5	6.50	144

La Ilustración 5-8, muestran el diagrama de Pareto para la respuesta del coagulante; las variables significativas para esta respuesta son el número de módulos, el número de placas, y en menor medida la interacción del número de módulos con la densidad de corriente. Esto indica que, las variables significativas, reducen la cantidad de coagulante generado en sus niveles altos.

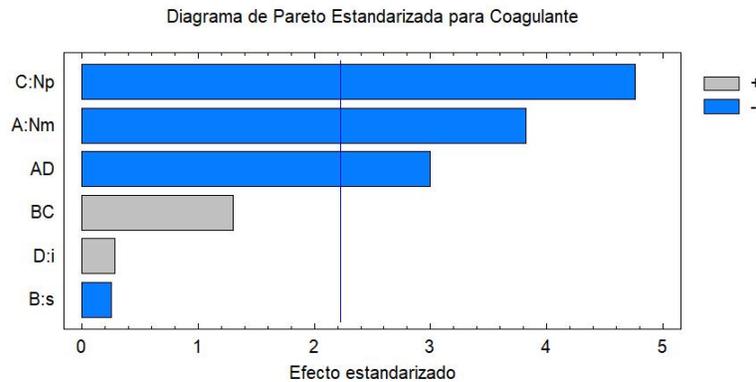


Ilustración 5-8 Efectos principales para la variable de respuesta coagulante. a) Número de placas, b) Separación de las placas, c) Densidad de corriente y d) Concentración de coagulante por módulo.

El modelo de regresión para la generación de coagulante se muestra con la expresión 5-3, con una R^2 cuadrada de 84.5229 y ajustada de 75.2414, donde se eliminaron los términos no significativos, lo anterior debido a que se consideraron como no significativos aquellos cuyo valor de P sea mayor a 0.7.

$$Ct_{aj} = 11.3356 + 0.739844Nm - 236.583s - 1.0493Np + 0.259638i - 0.0509766Nmi + 39.4861sNp \tag{5-3}$$

La Ilustración 5-9, muestra la exactitud y fiabilidad del modelo para para la predicción del coagulante presente en el sistema con respecto a las variables de análisis.

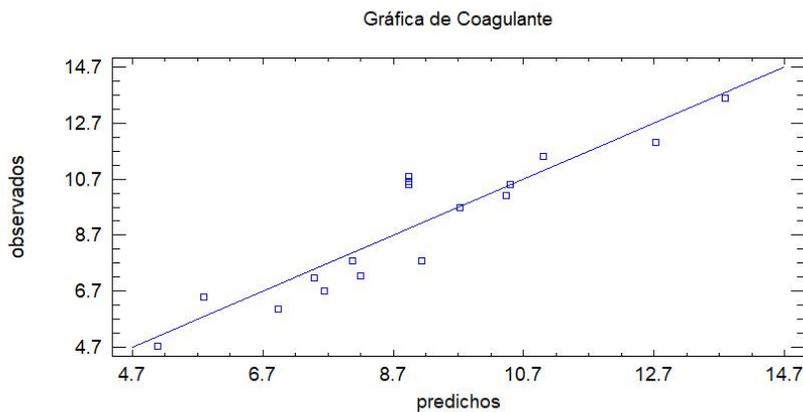


Ilustración 5-9 Corriente suministrada y su efecto en la concentración de coagulante.

La Tabla 5-6, muestra el resumen del ANOVA para la generación de coagulante, se puede confirmar que la variable de mayor impacto es el número de módulos con una P de 0.0034, seguida del número de placas (0.0008) y de la interacción (Np-Nm) con 0.0134 como valor de P.

Tabla 5-6 ANOVA para la concentración de coagulante

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A: Nm	21.606	1	21.606	14.58	0.0034
B: s	0.0976503	1	0.0976503	0.07	0.8026
C: Np	33.577	1	33.577	22.65	0.0008
D: i	0.120997	1	0.120997	0.08	0.7809
AD	13.3049	1	13.3049	8.98	0.0134
BC	2.52583	1	2.52583	1.70	0.2210
Error total	14.8234	10	1.48234		
Total (corr.)	95.7952	16			

De acuerdo con la Ilustración 5-10, menor número de módulos y menor cantidad de placas permiten mayor generación de coagulante, considerando constantes la

separación y la densidad de corriente, un centímetro y 40 A/m², respectivamente. Mientras que, al aumentar el número de módulos, el número de placas reduce su impacto en la generación de coagulante.

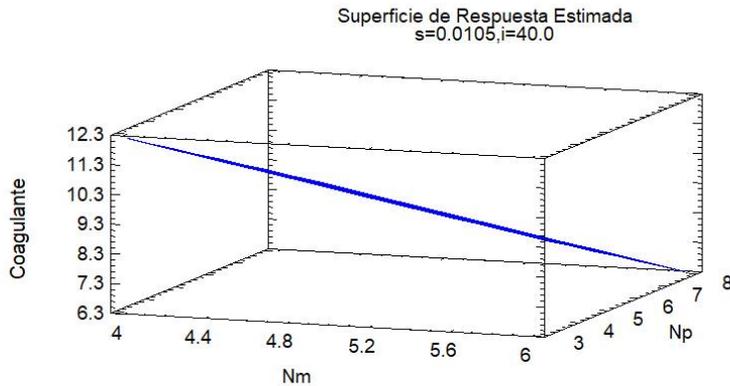


Ilustración 5-10 Interacción de Nm y s para el coagulante.

5.2.1 Eficiencia en generación de coagulante

La eficiencia de generación para cada uno de los casos del diseño de experimentos se presentó en la última columna de la Tabla 5-5. De acuerdo con la gráfica de Pareto (Ilustración 5-11), la variable significativa para la eficiencia de producción es el número de electrodos que conforman el reactor.

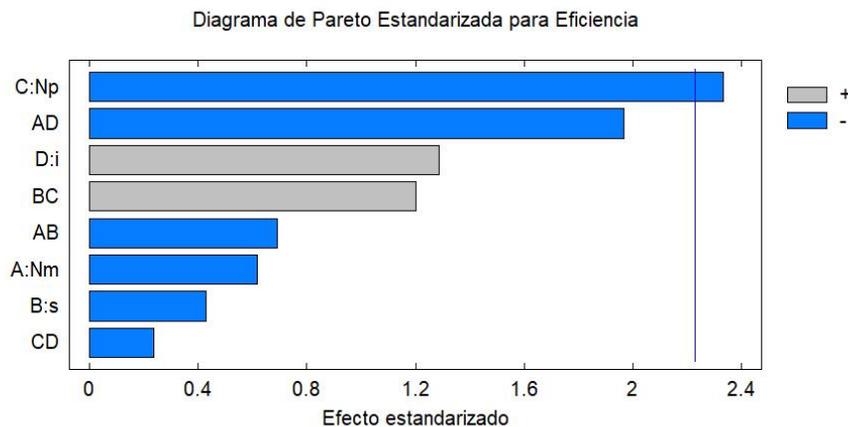


Ilustración 5-11 Diagrama de Pareto para la eficiencia de generación de coagulante

La Tabla 5-7, presenta el resumen del ANOVA para la eficiencia de generación de coagulante, se puede observar que la única variable cuyo valor de P es menor a 0.05 corresponde al número de placas, lo cual coincide con la gráfica de Pareto

mostrada previamente. La R^2 para la eficiencia es de 57.4696 por ciento y R^2 de 23.4453 por ciento. La expresión 5-4, corresponde a la ecuación de ajuste para esta variable de respuesta.

Tabla 5-7 Resumen ANOVA para la eficiencia de generación de coagulante

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
A: Nm	1.29675	1	1.29675	0.38	0.5515
B: s	0.626077	1	0.626077	0.18	0.6776
C: Np	18.5937	1	18.5937	5.44	0.0418
D: i	5.65845	1	5.65845	1.66	0.2270
AB	1.62881	1	1.62881	0.48	0.5055
AD	13.2223	1	13.2223	3.87	0.0774
BC	4.92285	1	4.92285	1.44	0.2575
CD	0.194702	1	0.194702	0.06	0.8161
Error total	34.1485	10	3.41485		
Total (corr.)	80.2922	18			

$$\eta_c = -4.20306 + 2.27792Nm + 39.375s - 0.859307Np + 0.269134i - 70.9028Nms - 0.0454531Nmi + 49.3056sNp - 0.00220625Npi \quad 5-4$$

De acuerdo con lo reportado por (Cañizares, et al., 2005) la eficiencia mayor al 100% se debe principalmente a la presencia de la reacción química en la vecindad de los electrodos, ocasionado por un cambio en el pH.

5.3 PRUEBA DE TRAZADORES

Los valores de tiempo de residencia hidráulico (TRH), cortocircuitos (CC) y zonas muertas (ZM) se calcularon por medio de la metodología presentada por Martín y Tzatchkov (1999). En la Tabla 5-8, se muestran los tiempos de residencia hidráulicos (TRH) teóricos (τ) y reales (μ) que se presentaron en los diferentes casos de estudio, antes (subíndice SG) y durante la reacción electroquímica (subíndice CG), sin embargo, el análisis del diseño de experimentos se revisó únicamente con los datos obtenidos durante la reacción electroquímica.

5.3.1 Tiempo de residencia hidráulico

En la Ilustración 5-12 se muestra el diagrama de Pareto para el tiempo de residencia hidráulico, donde la densidad de corriente, la separación de las placas, el número de módulos, la interacción de la densidad de corriente y la separación de las placas, y la interacción del número de módulos y la separación de las placas son variables de significancia para el modelo de ajuste. El aumento de esta respuesta se presenta con la reducción de la densidad de corriente y el aumento de la separación de placas principalmente.

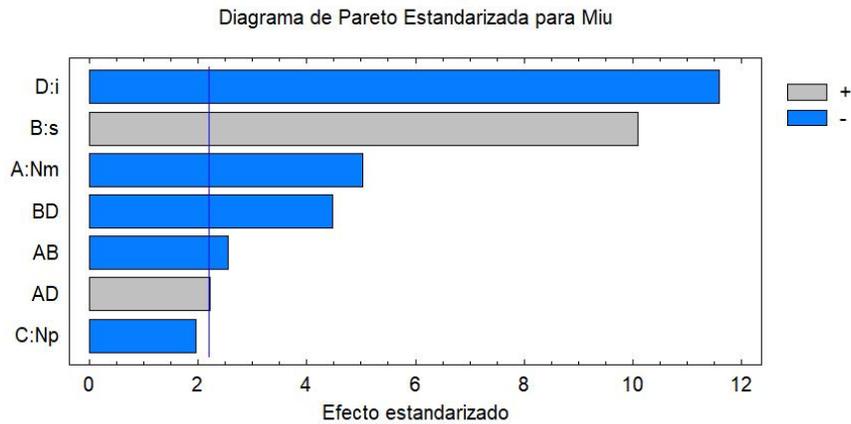


Ilustración 5-12 Tiempo de residencia hidráulico para distintas separaciones con reacción electroquímica

Tabla 5-8 Tiempos de residencia hidráulicos del sistema, en presencia de gas (CG) y ausencia (SG)

CASO	Q	τ (min)	μ_{SG} (min)	DIF	μ_{CG} (min)	DIF
12	20.1	0.655	0.656	0.001	0.533	0.122
4	13.4	1.021	1.04	0.019	0.961	0.06
11	6.7	3.563	3.624	0.061	1.509	2.054
3	4.5	3.108	3.245	0.137	2.263	0.845
14	70.5	0.235	0.247	0.012	0.206	0.029
5	15.7	1.103	1.146	0.043	1.122	0.019
13	23.5	0.609	0.556	0.053	0.64	0.031
6	47.0	0.547	0.573	0.026	0.445	0.102
1	4.5	1.407	1.465	0.058	1.578	0.171
2	13.4	0.627	0.651	0.024	0.366	0.261
9	6.7	1.029	1.075	0.046	1.448	0.419
10	20.1	0.451	0.471	0.02	0.713	0.262
7	15.7	2.412	1.813	0.599	2.256	0.156
15	23.5	1.702	1.767	0.065	3.794	2.092
8	47.0	0.817	0.769	0.048	2.294	1.477
16	70.5	0.562	0.249	0.313	0.206	0.356

El modelo de regresión para el TRH_CG corresponde a la expresión 5-5, con una R^2 de 96.4282 y 94.1552 ajustado. Por su parte, la Ilustración 5-13 muestra el ajuste del modelo para el modelo de ajuste del TRH_CG.

$$TRH_{CG_{aj}} = 0.877249 - 0.129708Nm + 260.722s - 0.0288007Np - 0.0225344i - 20.9028Nms + 0.00408438Nmi - 1.83542si$$

5-5

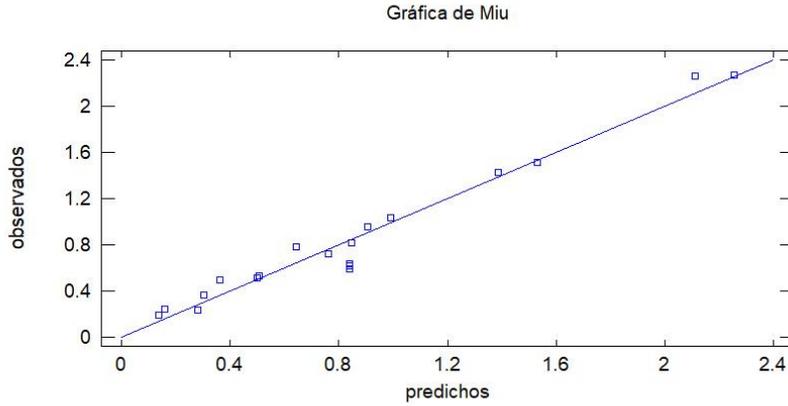


Ilustración 5-13 Porcentaje de ajuste de los efectos estandarizados.

La Tabla 5-9 muestra el resumen del análisis ANOVA, donde la variable de significancia es la densidad de corriente.

Tabla 5-9 Tabla resumen del ANOVA para los TRH_CG

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Nm	0.552421	1	0.552421	25.36	0.0004
B:s	2.22085	1	2.22085	101.96	0.0000
C:Np	0.0834721	1	0.0834721	3.83	0.0761
D:i	2.92667	1	2.92667	134.37	0.0000
AB	0.141564	1	0.141564	6.50	0.0270
AD	0.106766	1	0.106766	4.90	0.0489
BD	0.436591	1	0.436591	20.04	0.0009
Error total	0.239593	11	0.0217812		
Total (corr.)	6.70792	18			

Considerando constantes el número y separación de placas, seis y 0.015 m respectivamente, en la gráfica de la Ilustración 5-14, se observa que los TRH se reducen con altas densidades de corriente y bajo número de módulos. Con el aumento del volumen en contacto con la reacción, se genera mayor cantidad de gas generado, reduciendo el volumen líquido en la zona de reacción.

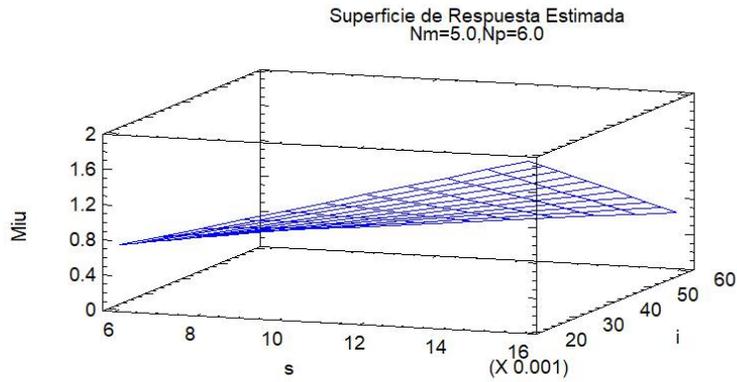


Ilustración 5-14 Interacción s e i en los TRH.

Finalmente, la Ilustración 5-15, muestra que el tiempo de residencia hidráulico, aumenta con menor número de módulos y mayor separación entre placas, esto debido a la relación directa que guarda con el caudal de tratamiento y la velocidad del flujo en el sistema.

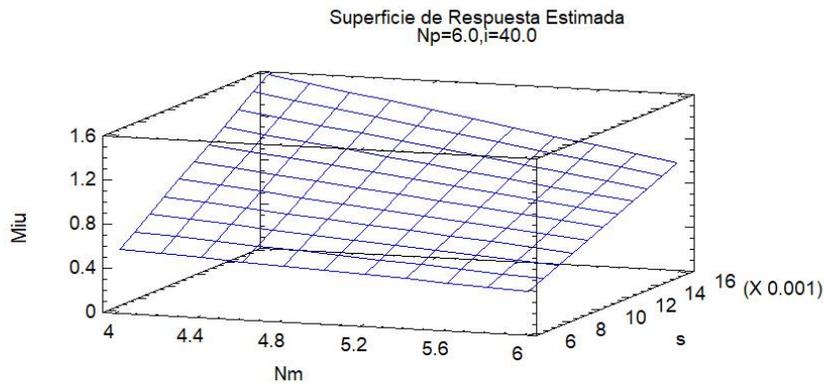


Ilustración 5-15 Interacción Nm e S en los TRH.

5.3.2 Zonas muertas y cortos circuito

La Ilustración 5-16, muestra los resultados del ajuste de modelo utilizado (línea negra) con los datos recabados en el laboratorio (puntos azules), para el experimento número cinco.

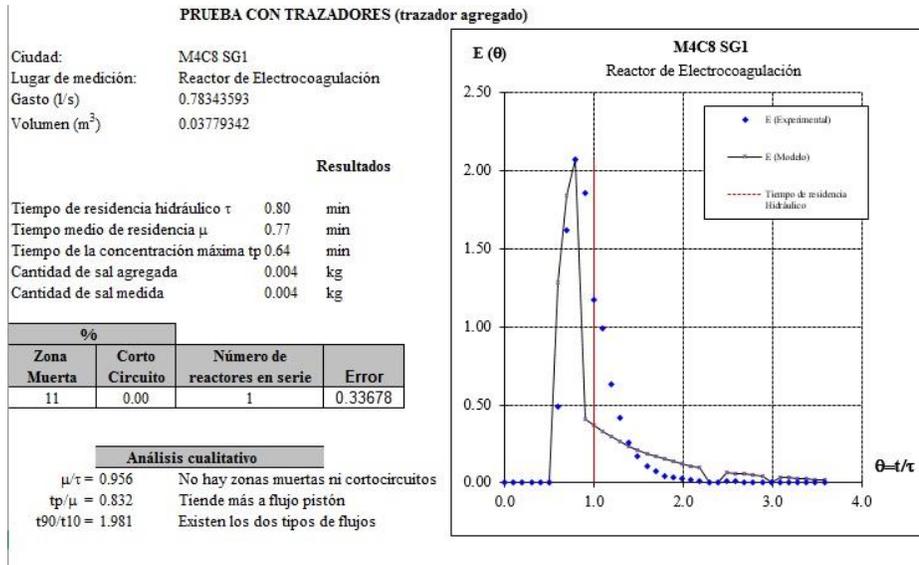


Ilustración 5-16 Resultados del modelo de prueba de trazadores para un caso de estudio

Los resultados de las ZM y CC de cada caso de estudio, así como la diferencia en presencia y ausencia de gas, se muestran en la Tabla 5-10.

El modelo de ajuste para las ZM, se muestra en 5-6, y se observa del diagrama de Pareto (Ilustración 5-17), que las variables significativas son, la separación de las placas, la interacción de la separación de placas y la densidad de corriente y finalmente la densidad de corriente presente en el sistema, la primera afectando de en la variable positiva y las últimas en la negativa a la presencia de zonas muertas.

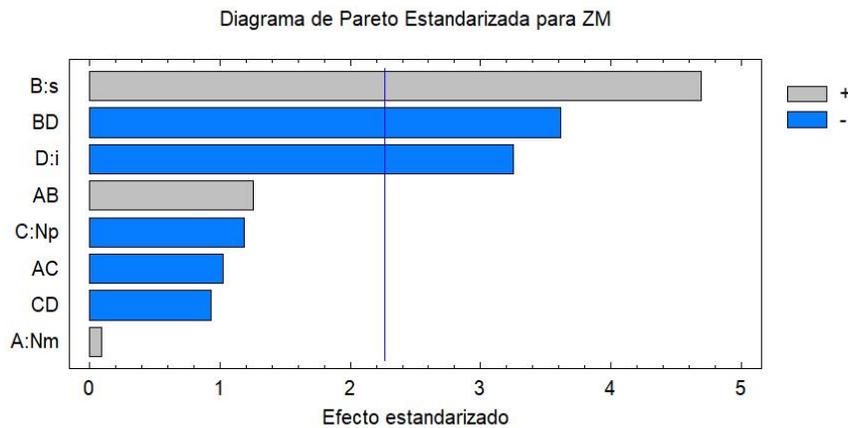


Ilustración 5-17 Diagrama de Pareto para Zonas Muertas

$$\begin{aligned}
 ZM_{CG_{aj}} = & -38.9412 - 1.80994Nm + 3923.28s + 7.26746Np \\
 & + 1.13091i + 871.695Nms - 1.28095NmNp \\
 & - 125.529si - 0.0584525Npi
 \end{aligned}$$

5-6

Tabla 5-10 Promedio de porcentaje de Zonas Muertas y Corto Circuito en cada caso de estudio.

CASO	Q	ZM _{SG}	ZM _{CG}	DIF (ZM)	CC _{SG}	CC _{CG}	DIF (CC)
12	20.1	64	32	18.49	0	0	0.0000
4	13.4	10	13	0.79	0	40	0.0000
11	6.7	35	75	45.55	52	0	21.4800
3	4.5	65	45	29.1	22	5	0.0000
14	70.5	1	7	0.08	53	31	2.9200
5	15.7	0	15	4.15	7	25	0.0000
13	23.5	21	0	7.79	53	1	0.0000
6	47.0	17	0	0	16	56	0.0000
1	4.5	20	27	7.45	13	26	0.0000
2	13.4	0	27	22.5	56	0	0.0000
9	6.7	0	8	4.79	32	24	23.0300
10	20.1	0	15	4.07	0	26	0.0000
7	15.7	64	68	2.9	63	43	0.0000
15	23.5	63	13	13.84	52	70	34.0000
8	47.0	65	19	10.74	52	33	0.0000
16	70.5	59	12	5.42	42	66	0.0000

La Tabla 5-11, muestra la tabla resumen del ANOVA para las ZM, con una R² de 84.0245 y ajustada de 69.824, eliminando las variables no significativas para el modelo, así mismo se confirma que la variable significativa es la interacción de la separación y número de placas con 0.0013 como valor de P, seguido del número de placas con 0.0056 y con 0.0056 la interacción del número de módulo y de placas.

Tabla 5-11 Tabla resumen ANOVA para las ZM_{CG}

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Nm	1.245	1	1.245	0.01	0.9262
B:s	3025.83	1	3025.83	22.03	0.0011
C:Np	194.028	1	194.028	1.41	0.2651
D:i	1454.44	1	1454.44	10.59	0.0099
AB	216.263	1	216.263	1.57	0.2412
AC	144.136	1	144.136	1.05	0.3324
BD	1793.92	1	1793.92	13.06	0.0056
CD	120.054	1	120.054	0.87	0.3743
Error total	1236.37	9	137.374		
Total (corr.)	7739.11	17			

Manteniendo constante el número de módulos y el número de placas, 5 y 6 respectivamente, se observa que las zonas muertas aumentan en presencia de

altas separaciones de electrodos y bajas densidades de corriente y de igual forma con bajas separaciones y altas densidades de corriente (Ilustración 5-18).

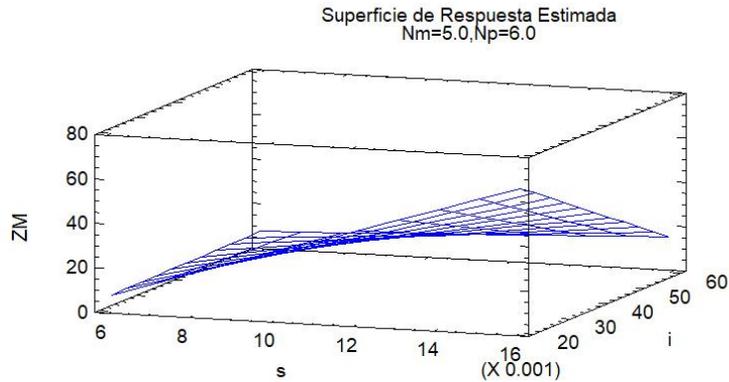


Ilustración 5-18 Interacción de la separación y densidad de corriente en el porcentaje de zonas muertas.

En la Ilustración 5-19, se muestra el comportamiento de las zonas muertas con la variación del número de módulo y de placas. Se observa que con bajo número de módulos el porcentaje de zonas muertas no se ve afectado por el número de placas, mientras que, al aumentar los módulos, las zonas muertas aumentan con menor número de placas.

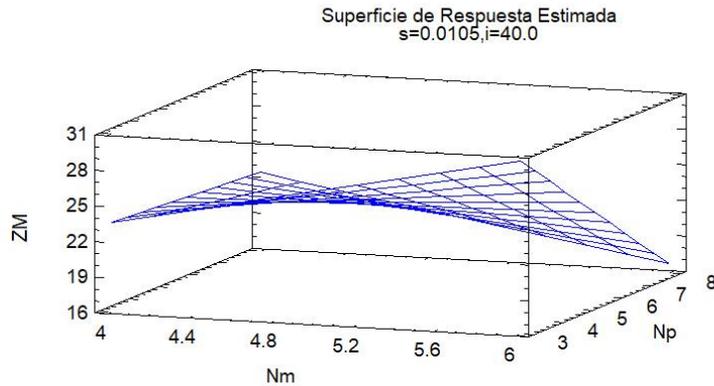


Ilustración 5-19 Interacción del número de módulos y de placas en el porcentaje de zonas muertas

La Ilustración 5-20, muestra el diagrama de Pareto para los cortos circuitos en el sistema, en el cual se observa que las variables significativas son la interacción del número de placas con la separación, seguidas del número de placas, la densidad de corriente, el número de módulos y la interacción del número de módulos con la

densidad de corriente. La expresión 5-7, muestra la ecuación de ajuste para el corto circuito en el diseño estudiado.

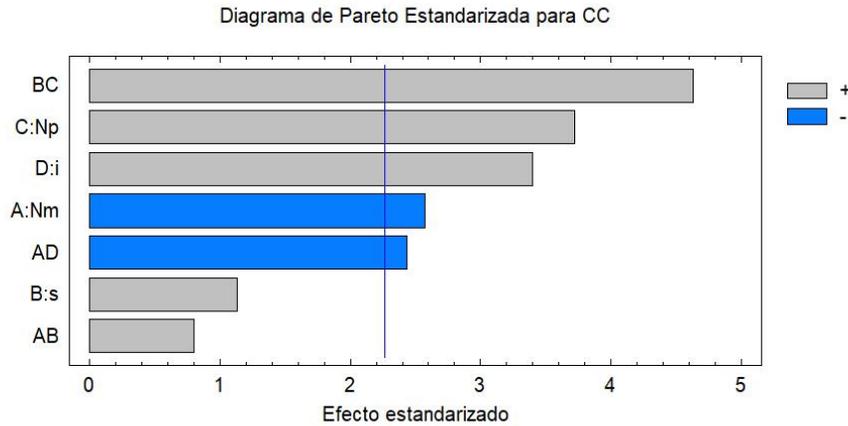


Ilustración 5-20 Diagrama de Pareto para corto circuito

$$CC_{CG_{aj}} = 54.0727 + 1.85643Nm - 10496.8s - 10.5953Np + 2.8437i + 622.783Nms - 0.444783Nmi + 1501.84sNp \quad 5-7$$

La R^2 es de 83.5394 por ciento y la R^2 de ajuste de 70.7368 por ciento. Lo anterior indica que el ajuste es pobre en la descripción del fenómeno. Sin embargo, permite identificar la variable de impacto.

La Ilustración 5-21, indica que la reducción de módulos y el aumento de la densidad de corriente, impacta de manera positiva a la presencia de cortocircuitos, mientras que estos se reducen en la condición contraria.

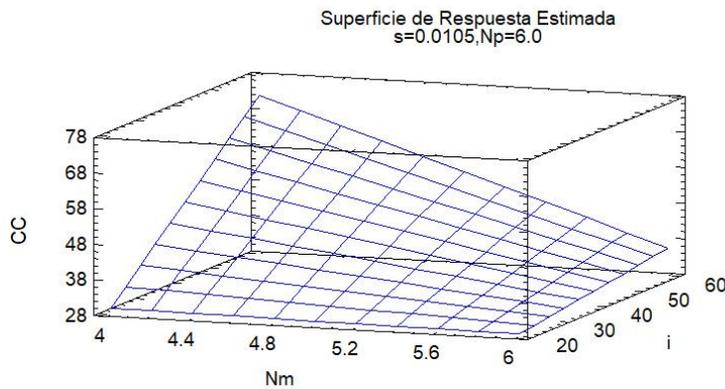


Ilustración 5-21 Superficie de respuesta para número de módulos y densidad de corriente.

Por otro lado, la Ilustración 5-22, muestra como el aumento del número de placas en presencia de las máximas separaciones permite la aparición de cortos circuitos en el sistema, mientras que en las separaciones mínimas no presenta impacto en los cortos circuitos.

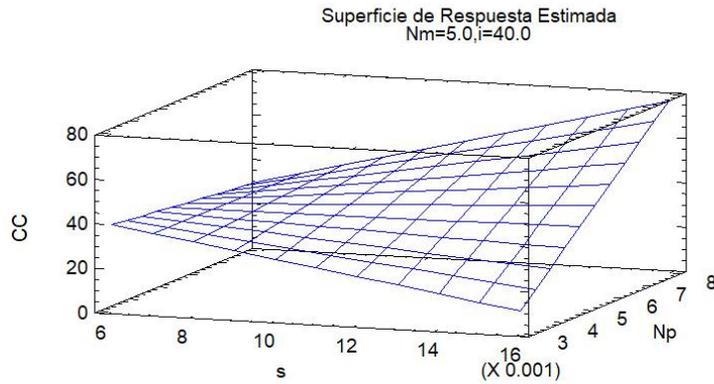


Ilustración 5-22 Superficie de respuesta para separación de placas y número de placas.

5.4 CARGA HIDRÁULICA

La Tabla 5-12, muestra los resultados del laboratorio y los valores teóricos. De acuerdo con el diagrama de Pareto mostrado en la Ilustración 5-23, la densidad de corriente, el número de placas y la interacción del número de placas y la densidad de corriente y el número de módulo y la densidad de corriente son significativas para el modelo de regresión mostrada en la expresión 5-8, así como sus interacciones con excepción del número de módulos y la densidad de corriente y la separación y el número de placas.

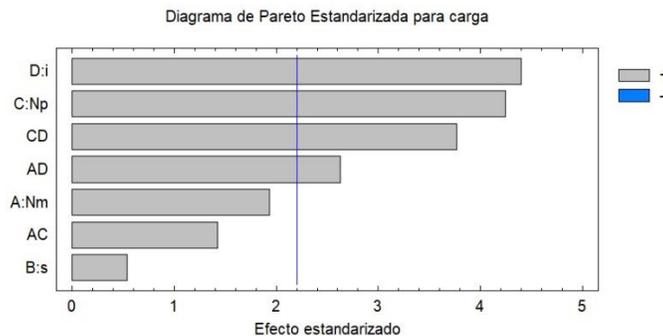


Ilustración 5-23 Diagrama de Pareto para la carga hidráulica

$$H_{aj} = 0.0800225 - 0.01275Nm + 0.236111s - 0.0082319Np - 0.00168063i + 0.001125NmNp + 0.000259375Nmi + 0.00014875Npi$$

5-8

Tabla 5-12 Comparación de cargas hidráulicas.

CASO	Q (L/min)	I (A)	v (m/s)	H _R (m)	H _{TCG} (m)	dH (m)	DIF
12	20.1	16.20	0.04145	0.017	0.018	0.004	0.0047
4	13.4	16.20	0.02763	0.017	0.015	0.002	0.0023
11	6.7	5.40	0.01382	0.013	0.009	0.001	0.0114
3	4.5	5.40	0.00921	0.014	0.007	0.001	0.0079
14	70.5	56.70	0.03886	0.065	0.042	0.028	0.0228
5	15.7	18.90	0.00864	0.02	0.016	0.003	0.0036
13	23.5	18.90	0.01295	0.011	0.020	0.005	0.0096
6	47.0	56.70	0.02591	0.025	0.034	0.015	0.0007
1	4.5	5.40	0.02303	0.009	0.007	0.002	0.0079
2	13.4	16.20	0.06909	0.013	0.015	0.01	0.0003
9	6.7	5.40	0.03454	0.016	0.009	0.003	0.0074
10	20.1	16.20	0.10363	0.015	0.018	0.018	0.0003
7	15.7	18.90	0.00345	0.019	0.016	0.001	0.0046
15	23.5	18.90	0.00518	0.011	0.020	0.001	0.0026
8	47.0	56.70	0.01036	0.035	0.034	0.003	0.0033
16	70.5	56.70	0.01554	0.065	0.042	0.007	0.0268
17	28.7	27.00	0.01645	0.018	0.020	0.004	0.0076
17	28.7	27.00	0.01645	0.019	0.020	0.004	0.0066

La Tabla 5-13, muestra el resumen del análisis de varianza, donde se observan las variables con significancia bajo una R² de ajuste igual a 85.4406 y 76.1756 ajustada. En ella se observa que la variable con mayor significancia es el número de placas con un valor de P de 0.0014, seguido de la densidad de corriente con 0.0011 y finalmente con 0.0031 la interacción del número de placas con la densidad de corriente, y 0.0235 la interacción del número de módulos con la densidad de corriente.

Tabla 5-13 Tabla resumen del ANOVA para la carga hidráulica

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Nm	0.000232562	1	0.000232562	3.73	0.0796
B:s	0.0000180625	1	0.0000180625	0.29	0.6011
C:Np	0.00112469	1	0.00112469	18.04	0.0014
D:i	0.00120756	1	0.00120756	19.37	0.0011
AC	0.000126562	1	0.000126562	2.03	0.1820
AD	0.000430563	1	0.000430563	6.91	0.0235
CD	0.000885063	1	0.000885063	14.19	0.0031
Error total	0.000685884	11	0.0000623531		
Total (corr.)	0.00471095	18			

La interacción de menor número de módulo y menor densidad de corriente (Ilustración 5-24), permiten obtener cargas hidráulicas pequeñas, que aseguren la desgasificación del reactor en la zona de ascenso. La carga tiene mayor incremento al aumentar el número de módulos o al aumentar la densidad de corriente, en el caso de que ambos se encuentren en su máximo valor, el aumento de la densidad de corriente se hace más evidente.

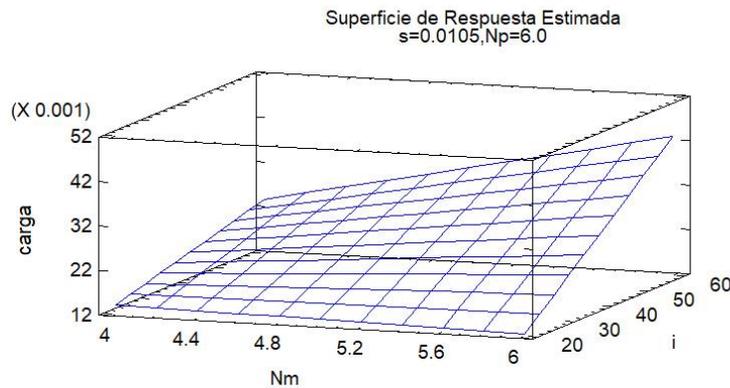


Ilustración 5-24 Efecto de Nm e i en la carga hidráulica.

Finalmente, la Ilustración 5-25 muestra la interacción del número de placas con la densidad de corriente, es posible observar como a mayor número de placas la densidad de corriente juega un papel importante en el aumento de la carga hidráulica.

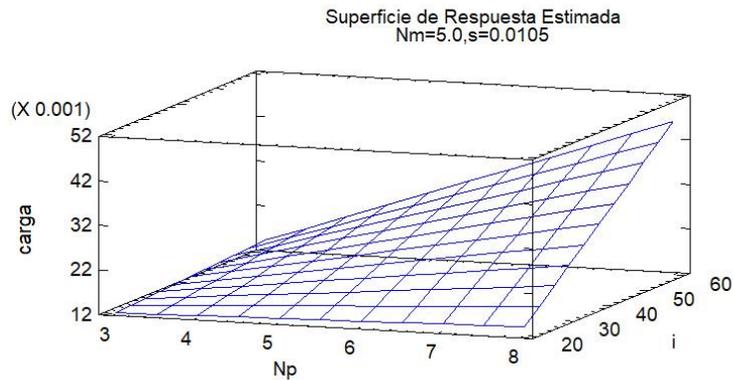


Ilustración 5-25 Efecto Np e i en la carga hidráulica

El modelo de ajuste propuesto no considera el caudal de tratamiento para el cálculo de la carga hidráulica ni las características de la sección de descarga, lo cual puede incurrir diferencias significativas con la realidad, por lo cual se procedió a realizar una regresión logarítmica con las mediciones de laboratorio, con la finalidad de comparar los resultados considerando el coeficiente de descarga apropiado.

Las ecuaciones 4-9 y 5-9 corresponden al caudal de descarga de un orificio ahogado y el caudal de descarga en un vertedor.

$$Q_v = bC_d\sqrt{2gH_v} \quad 5-9$$

Ambas ecuaciones corresponden a la forma (5-10), que es una ecuación potencial donde el valor de k incluye los efectos de la geometría de la descarga, el coeficiente de descarga y los efectos gravitacionales.

$$Q = kH^n \quad 5-10$$

Donde:

$$k = bC_d\sqrt{2g}$$

Para el cálculo de la constante k, en el modelo físico se consideraron las cargas medidas para cada uno de los caudales de estudio, con lo anterior se construyó una gráfica de Q vs H y a continuación se realizó el ajuste de la expresión 5-10, por medio de logaritmos naturales, de esta manera, se obtuvo.

$$\ln Q = \ln k H^n$$

$$\ln Q = \ln k + n \ln H$$

Al considerar lo siguiente:

$$y = \ln Q$$

$$a = \ln k$$

$$b = n \ln H$$

Se obtiene la expresión de una ecuación que, por medio de una regresión lineal, permite obtener los valores de k y n respectivamente. Para los cálculos de la regresión se hace uso de la Tabla 5-14 y se realiza la regresión de los datos.

Tabla 5-14 Tabla de regresión carga vertedor sin gas.

CASO	SIN GAS		CON GAS	
	Q*=Ln(Q)	H*=LN(H)	Q*=Ln(Q)	H*=LN(H)
1	-9.503	-4.605	-9.503	-4.711
2	-8.405	-4.605	-8.405	-4.343
3	-9.503	-4.269	-9.503	-4.711
4	-8.405	-4.135	-8.405	-4.075
5	-8.250	-4.605	-8.250	-3.912
6	-7.152	-3.474	-7.152	-3.689
7	-8.250	-4.075	-8.250	-3.963
8	-7.152	-3.352	-7.152	-3.689
9	-9.098	-4.605	-9.098	-4.135
10	-7.999	-4.075	-7.999	-4.200
11	-9.098	-3.963	-9.098	-4.135
12	-7.999	-3.912	-7.999	-4.075
13	-7.845	-3.576	-7.845	-4.510
14	-6.746	-3.101	-6.746	-2.733
15	-7.845	-3.963	-7.845	-4.510
16	-6.746	-2.797	-6.746	-2.733
17	-7.671	-4.510	-7.671	-4.017

De la regresión se obtiene un coeficiente de correlación de 0.7763 y una R cuadrada de ajuste de 60.2674 por ciento, cuya gráfica se muestra en la Ilustración 5-26 y resultado como modelo de regresión:

$$\ln Q = -3.3036 + 1.2053H$$

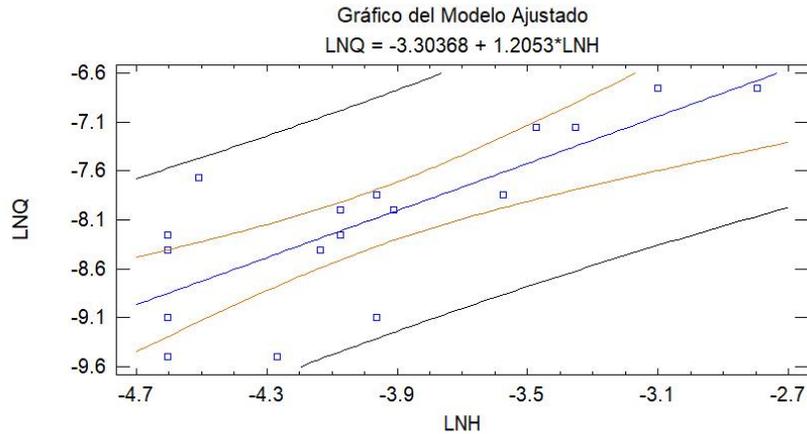


Ilustración 5-26 Gráfico de modelo de regresión ajustado

Con lo anterior se calcular el coeficiente de descarga del modelo físico obteniendo como resultado, 0.0921 para este modelo físico en particular.

$$C_d = \frac{e^k}{b\sqrt{2g}} = 0.0921$$

$$n = 1.2052$$

Finalmente, el modelo para la carga hidráulica utilizado para este modelo experimental resulta:

$$Q = 0.0921b\sqrt{2g}H^n$$

5.5 ANÁLISIS DE LOS MODELOS DE REGRESIÓN

Con la finalidad de validar los resultados obtenidos con la ecuación acoplada, se realizan cuatro cálculos de diseño y los resultados se comparan con los modelos de ajuste del diseño de experimentos. La Tabla 5-15 muestra los valores obtenidos para distintos caudales de diseño, así como los valores de las respuestas obtenidos con los dos métodos.

Tabla 5-15 Resumen comparativo de los modelos ajustados y la ecuación acoplada

Variables de diseño y operación (Ecuación de acople)				
i (A/m ²)	58.8979	24.597	38.5663	36.3331
s (m)	0.006	0.0123	0.00838	0.0076
Np	5	5	6	7
Nm	6	5	4	6

Q (L/min)	5	30	53	65
Modelos del diseño de experimentos				
Vol _{aj} (V)	8.214	6.277	6.902	7.664
C _{aj} (mg/L)	7.571	9.424	10.151	7.053
Hv _{aj} (m)	0.029	0.022	0.022	0.033
TRH _{aj} (min)	0.281	1.728	0.983	0.712
Zm _{aj} (%)	42.659	29.383	11.097	0
CC _{aj} (%)	6.152	15.527	33.523	15.360
η _c	157.96	182.62	159.63	154.25
C _R (mg/L)	4.8	5.2	6.4	4.6
Ecuación acoplada				
Vol (V)	6.802	5.576	6.017	5.506
dh (m)	0.0074	0.002	0.00089	0.00221
Hv (m)	0.0063	0.0381	0.0673	0.0826
Vel (m/s)	0.1239	0.11076	0.2442	0.2754
G (s ⁻¹)	5.5216	18.39	41.1342	42.5407
db (m)	4.45e-4	2.07e-4	3.19e-4	3.31e-4
C _R (mg/L)	4.5	5.4	6.75	4.5

La Tabla 5-16, muestra las diferencias existentes entre el voltaje y la carga hidráulica del vertedor, se observa que los resultados de los modelos de ajuste tienen una diferencia de hasta 30% y los de carga, hasta de 492%. Lo anterior nos indica que, para el caso del voltaje, se pudieron presentar problemas de conexión durante la experimentación lo cual deriva en los porcentajes de error. Por otro lado, el modelo de ajuste del diseño de experimentos no es útil para predecir el comportamiento de esta, a partir de las variables de diseño seleccionadas.

Tabla 5-16 Diferencias de los modelos ajustados por el diseño de experimentos y la ecuación acoplada

	Diferencia			
Vol	15%	3%	12%	28%
Hv	492%	46%	67%	53%
C _R	5%	4%	1%	3%

La herramienta estadística Statgraphics® realiza la optimización de múltiples parámetros, la cual sugiere valores que maximicen o minimicen la deseabilidad de cada variable de respuesta. El valor de deseabilidad máximo es 1.0, indicando que las respuestas están cercanas a un valor ideal. Las condiciones de diseño que permiten optimizar las variables de respuesta de acuerdo con el diseño de experimentos son cuatro módulos con siete placas en cada uno a una separación

de 0.015 m y 20 A/m² de densidad de corriente. Bajo estas condiciones de diseño se puede obtener 12.9294 mg/L de coagulante, utilizando 4.9193 Volts, en cuanto a las condiciones hidráulicas, se presentaría una carga de 0.0104 m, 3.71 % de zonas muertas, cero por ciento de corto circuito y un tiempo de residencia hidráulico de 1.22374 min en el sistema.

5.6 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN EN FLUENT®

La importancia de las simulaciones recae en la identificación de las velocidades y líneas de flujo presente a lo largo de la trayectoria dentro del reactor, así como la visualización de las zonas muertas y cortos circuitos.

En la Ilustración 5-27, se puede observar que el flujo en ausencia de la reacción genera velocidades menores a 0.07 m/s, el flujo se divide homogéneamente en los canales de ascenso, se pueden observar las zonas muertas en las esquinas inferiores y en el panel de división entre el bajante y la zona de reacción.

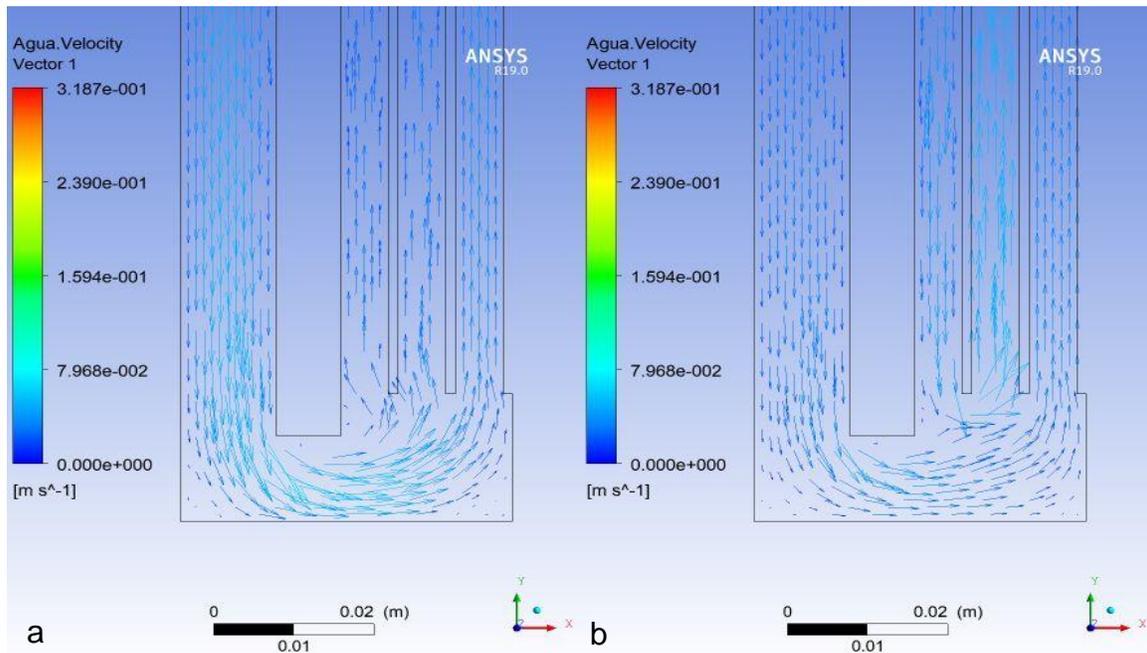


Ilustración 5-27 Distribución de velocidades zona inferior reactor sin gas.

En la modelación con presencia de gas, el flujo en la zona ascendente aumenta considerablemente, presentando velocidades entre 0.195 m/s y 0.079 m/s en el experimento uno. De acuerdo con la simulación existe un reflujo ocasionado por el caudal de gas generado en la reacción electroquímica.

Las velocidades en las geometrías de mayor tamaño (Ilustración 5-28), se distribuyen con menor homogeneidad, presentándose las mayores velocidades en los canales más alejados de la entrada de flujo, así mismo el flujo muestra cuatro canales preferenciales de ascenso (a) con velocidades menores a 0.3 m/s, mientras

que, en el caso (b), se observa al aumento de velocidad en el canal si reacción, por la presencia del gas, alcanzando una velocidad de hasta 0.4 m/s, por otro lado en la zona de reacción, la velocidad se homogeniza. El modelo numérico no considera la reacción electroquímica, por lo que el gas que ingresa al medio se comporta como una barrera para el flujo de agua, lo cual permite la distribución en los canales aledaños.

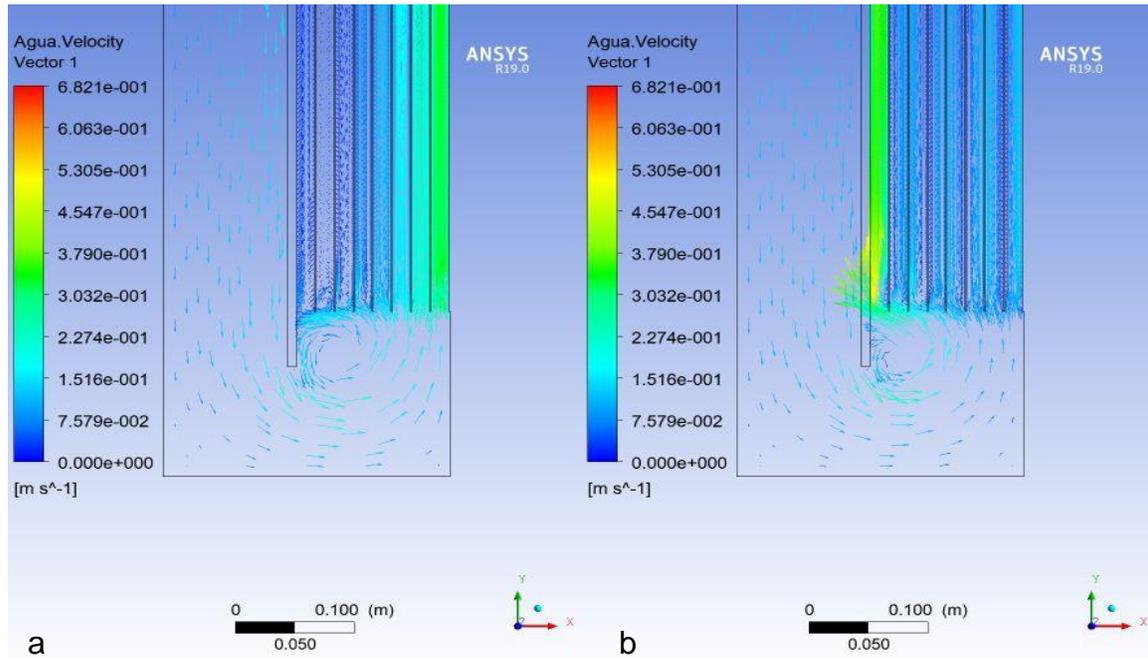


Ilustración 5-28 Distribución de velocidades zona inferior reactor, experimento dieciséis Izquierda con gas, derecha, sin gas.

Se analizaron los perfiles de velocidades en la zona inferior de la simulación (Ilustración 5-29), donde se observa el comportamiento de las velocidades, así como la distribución de caudal en los canales de ascenso. Las velocidades en ausencia de gas resultan tener mayor homogeneidad. Por otro lado, las velocidades en presencia del gas (figura b) son significativamente mayores.

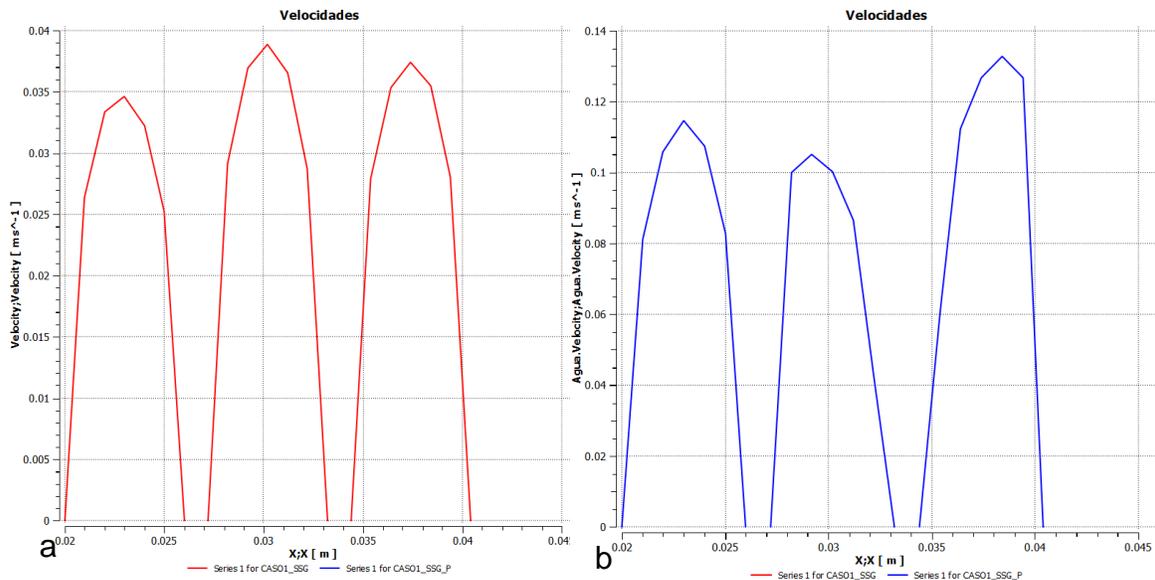


Ilustración 5-29 Velocidad de flujo en los canales de ascenso caso 1.

De acuerdo con las modelaciones, las velocidades del flujo si son afectadas por la generación de gas en la reacción, la distribución de velocidades tiene un comportamiento más homogéneo con la presencia del gas en los reactores con mayor número de placas, en ambos casos la velocidad en la vecindad del electrodo aumenta. De acuerdo con la Ilustración 5-30, se puede observar que el flujo tiene zonas preferenciales de movimiento, lo cual se traduce como cortos circuito en el sistema, también se puede concluir que los cortos circuito se presentan en los casos con mayor densidad de corriente y mayor número de placas.

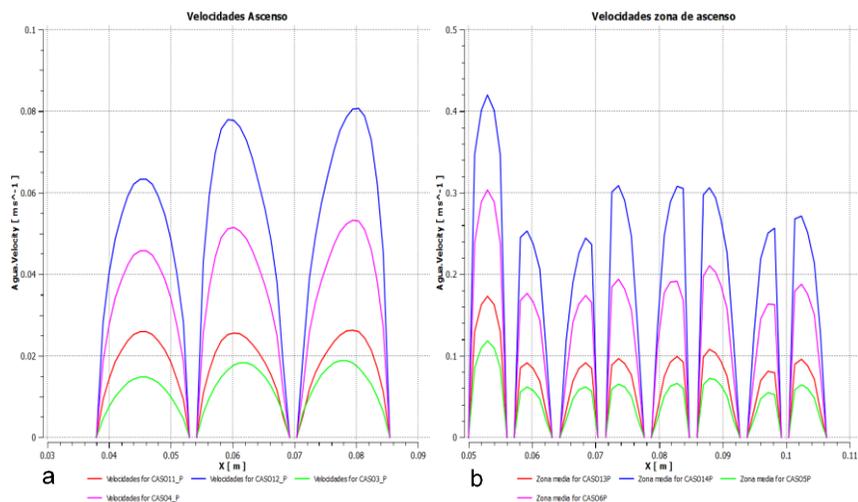


Ilustración 5-30 Velocidad de flujo en los canales de ascenso (a) módulo 1 y (b) módulo 4.

En la Ilustración 5-31, se observa la formación de una capa de gas en la vecindad del electrodo, como reporta (Mandin, et al., 2008). De acuerdo con la simulación la formación de esta capa depende de la velocidad y dirección de flujo. Esta se forma principalmente en las caras opuestas a la dirección del flujo, de lo contrario el fluido arrastra las partículas.

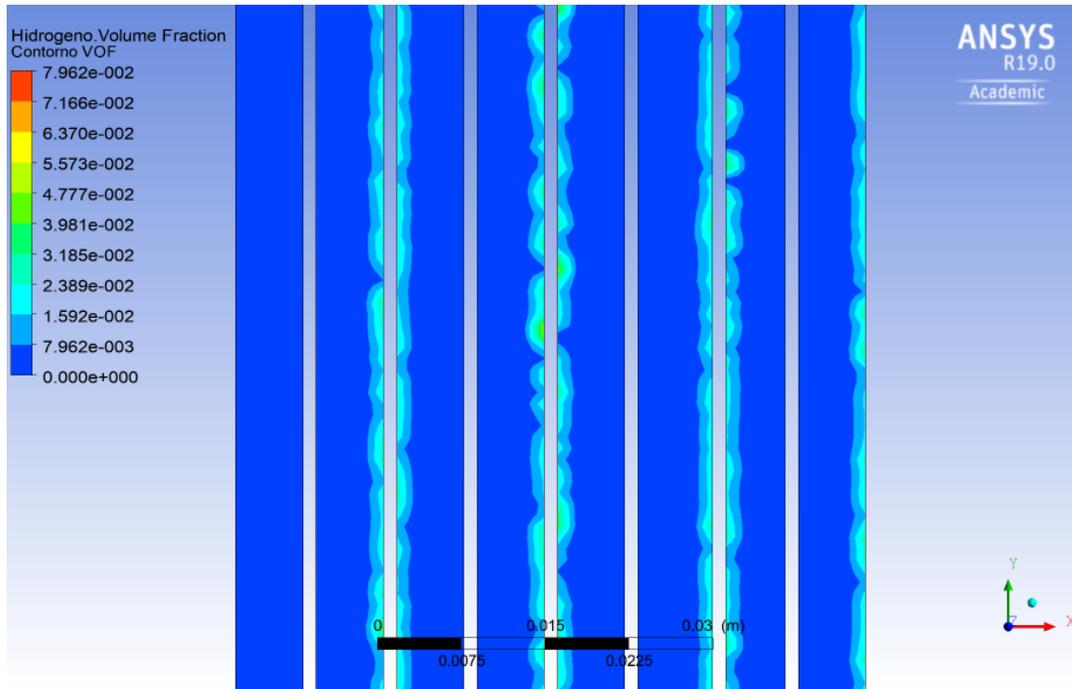


Ilustración 5-31 Fracción de volumen del hidrógeno generado.

En la Ilustración 5-32, se puede comparan dos módulos estudiados con un caudal de tratamiento de 20 l/min, se comparan las velocidades y zonas muertas presentes en la zona inferior del módulo, se puede observar que el aumento en el número de placas y su separación conllevan a la reducción de velocidad en esta zona, con lo cual se presenta un estancamiento del volumen tratado.

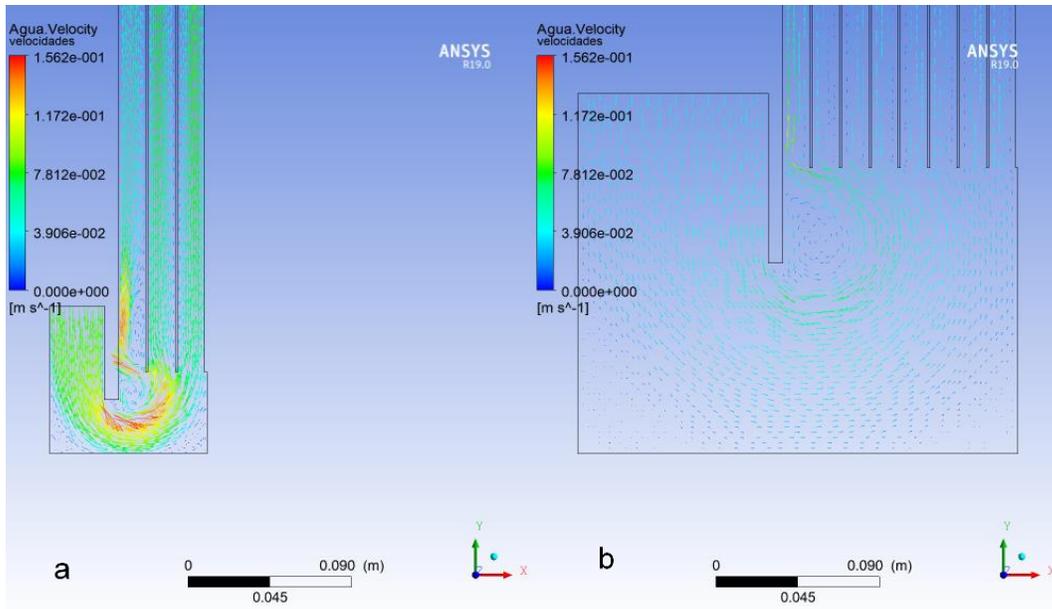


Ilustración 5-32 Velocidad de flujo zona inferior (a) caso 10 y (b) caso 12.

De manera similar, al comparar el comportamiento de un solo módulo a diferentes condiciones de densidad de corriente (Ilustración 5-33), se puede observar que cuando la densidad de corriente es baja (caso a y d), se presenta un mayor estancamiento en la zona inferior, esto se relaciona de manera directa con el caudal de tratamiento y la velocidad del flujo en el módulo.

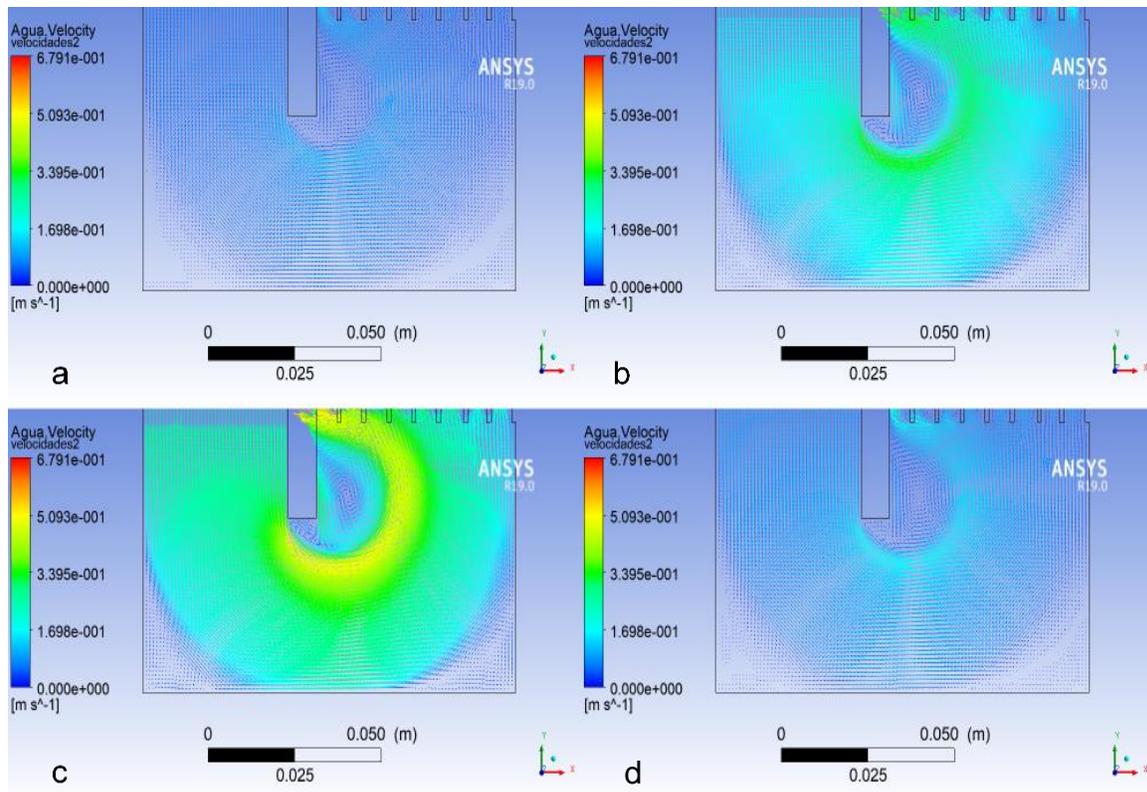


Ilustración 5-33 Vectores de velocidad de flujo zona inferior, módulo 4.

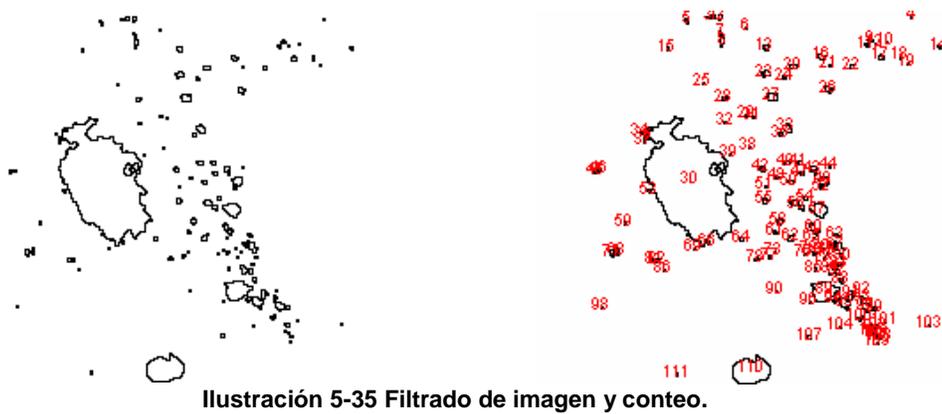
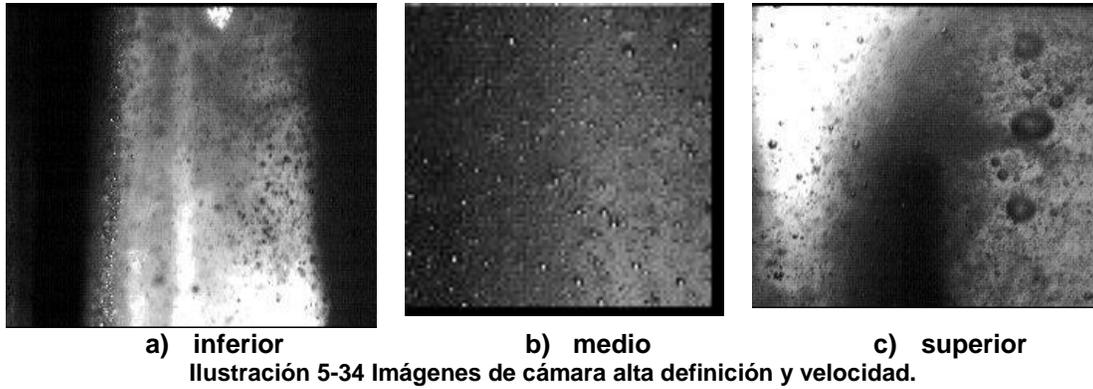
La modelación numérica permite tener una idea general del comportamiento dentro del reactor, sin embargo, no puede representarse la totalidad del fenómeno electroquímico que se lleva a cabo en los electrodos.

5.7

5.8 ANÁLISIS DE IMÁGENES

5.8.1 Diámetro de burbujas

Las imágenes capturadas se muestran en la Ilustración 5-34 y posteriormente, fueron sometidas a un ajuste de filtros, con el *programa* ImageJ®, obteniendo los resultados mostrados en la Ilustración 5-35.



Una vez aplicados los filtros, se obtuvieron las frecuencias de aparición (Ilustración 5-36) durante el tiempo de captura. Se puede observar que las burbujas de menor diámetro tienen mayor frecuencia de aparición, y son predominantes durante la reacción y su trayectoria.

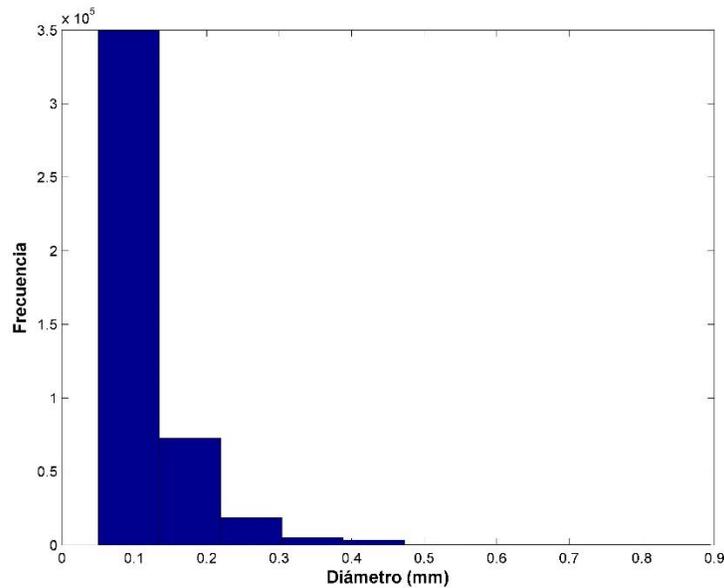


Ilustración 5-36 Frecuencia de aparición de diámetros experimento uno, zona inferior izquierda.

Con las distribuciones de diámetros se calculó el diámetro medio y la desviación estándar en cada zona de análisis, con la totalidad de los datos y analizando las imágenes a cada segundo de captura. La Tabla 5-17, muestra los diámetros medios de cada experimento, así como su desviación estándar.

Tabla 5-17 Diámetros de interés zona izquierda experimento uno.

Caso	Mediana (m)	Desviación estándar	Q (l/min)
1	6.18E-05	6.94E-05	4.5
2	6.18E-05	1.24E-04	13.4
3	1.18E-04	2.16E-04	4.5
4	8.16E-05	6.31E-05	13.4
5	1.01E-04	8.26E-05	15.7
6	1.78E-04	1.55E-04	47.1
7	9.99E-05	8.48E-05	15.7
8	1.74E-04	1.57E-04	47.1
9	7.14E-05	1.60E-04	6.7
10	7.58E-05	8.43E-05	20.2
11	1.64E-04	2.53E-04	6.7
12	6.06E-05	4.32E-05	20.2
13	7.14E-05	1.02E-04	23.5
14	1.56E-04	2.16E-04	70.6
15	7.85E-05	1.22E-04	23.5
16	1.55E-04	2.18E-04	70.6

Con el valor de la mediana de los diámetros, se analiza la significancia de las variables y se obtiene el modelo del diseño experimental, eliminando los valores atípicos y las variables no significativas. La Ilustración 5-37, muestra el diagrama de Pareto donde se observa que las variables significativas son número de placas, relación de número de placas y densidad de corriente y finalmente la densidad de corriente. A mayor número de placas y densidad de corriente aumenta el diámetro de la burbuja.

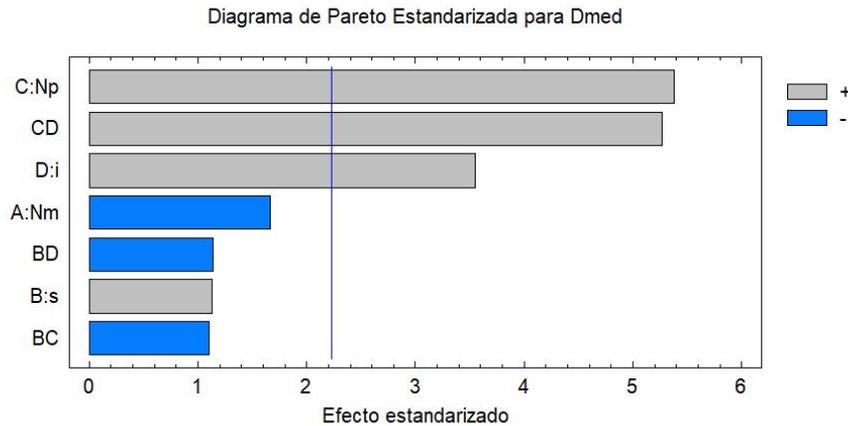


Ilustración 5-37 Diagrama de Pareto para el diámetro de burbuja

La Tabla 5-18, muestra el resumen ANOVA del diámetro de burbujas, donde se puede observar que el valor P para las variables significativas son 0.0003 para el número de placas, 0.0004 para la interacción del número de placas y la densidad de corriente y 0.0053 para la densidad de corriente.

Tabla 5-18 Resumen ANOVA para diámetro de burbuja

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Nm	7.70712E-10	1	7.70712E-10	2.76	0.1275
B:s	3.56921E-10	1	3.56921E-10	1.28	0.2844
C:Np	8.06072E-9	1	8.06072E-9	28.90	0.0003
D:i	3.50773E-9	1	3.50773E-9	12.57	0.0053
BC	3.39319E-10	1	3.39319E-10	1.22	0.2959
BD	3.64086E-10	1	3.64086E-10	1.31	0.2799
CD	7.75243E-9	1	7.75243E-9	27.79	0.0004
Error total	2.78956E-9	10	2.78956E-10		
Total (corr.)	2.65182E-8	17			

La expresión 5-11, muestra el modelo de ajuste para el cálculo del diámetro de burbuja con una R² de 89.4806 por ciento y una R²_{aj} de 82.117 por ciento.

$$db_{aj} = 0.0000936435 - 0.00000735636Nm + 0.00574598s - 5-11$$

$$0.00000459298Np - 0.00000119185i - 0.000433879sNp -$$

$$0.0000561793si + 4.66623E - 7 * Npi$$

Finalmente, la Ilustración 5-38 muestra la superficie de respuesta para la interacción del número de placas y la densidad de corriente. Se observa que, al aumentar el número de placas, el diámetro de burbuja se hace dependiente de la densidad de corriente, aumentando su diámetro con el aumento de la densidad.

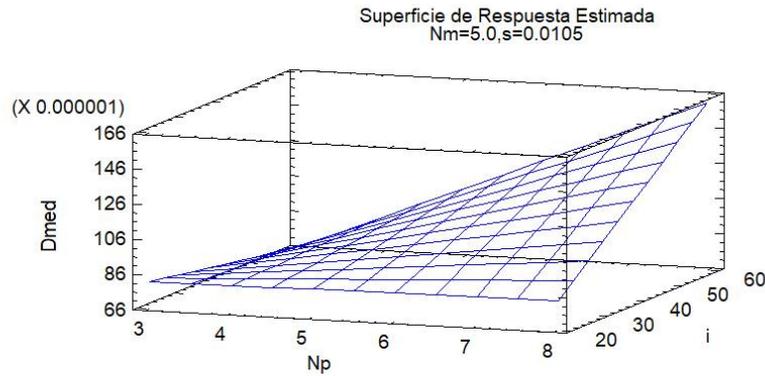


Ilustración 5-38 Superficie de respuesta con la interacción de número de placas y densidad de corriente

Posteriormente se compararon los diámetros de acuerdo con el caudal de tratamiento. La Ilustración 5-39, muestra los diámetros medianos obtenidos para los diferentes experimentos, se observa que estos se encuentran alrededor de $1e-4$ m, el valor mínimo es de $6.06e-5$ y $1.78e-4$ metros como valor máximo.

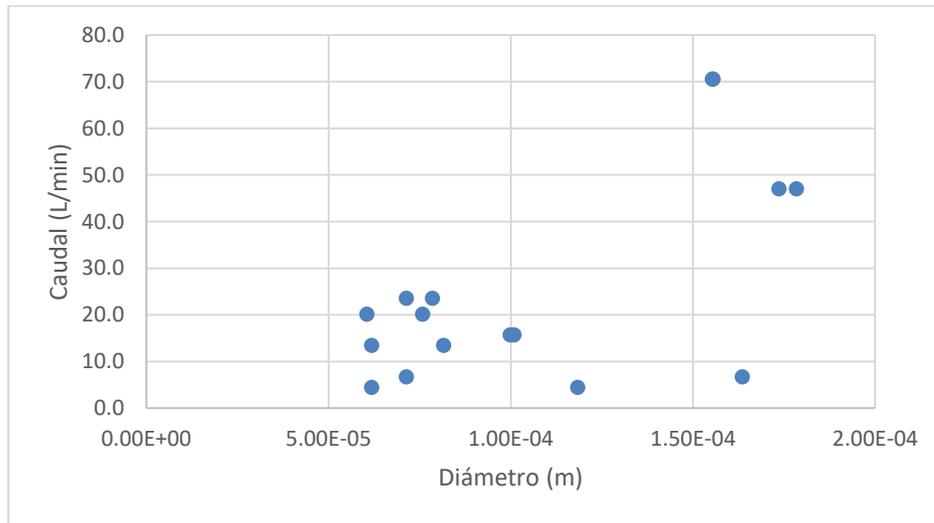


Ilustración 5-39 Diámetros medianos de la zona inferior con respecto al caudal

La información anterior permite definir una aproximación del número de burbujas resultantes del fenómeno de la electrocoagulación, como se muestra en la Tabla 5-19 con el diámetro representativo de cada caso de estudio.

Tabla 5-19 Número de burbujas mínimo y máximo de acuerdo con los diámetros límite

CASO	I	s	N _{pm}	N _m	N _{med}
	(A/m ²)	(m)			
1	20	0.006	3	4	8.82E+09
2	60	0.006	3	4	8.82E+09
3	20	0.015	3	4	2.20E+10
4	60	0.015	3	4	2.20E+10
5	20	0.006	8	4	2.35E+10
6	60	0.006	8	4	2.35E+10
7	20	0.015	8	4	5.87E+10
8	60	0.015	8	4	5.88E+10
9	20	0.006	3	6	9.17E+09
10	60	0.006	3	6	9.17E+09
11	20	0.015	3	6	2.29E+10
12	60	0.015	3	6	2.29E+10
13	20	0.006	8	6	2.44E+10
14	60	0.006	8	6	2.44E+10
15	20	0.015	8	6	6.11E+10
16	60	0.015	8	6	6.11E+10

Por otro lado, al considerarse los diámetros medianos calculados para cada uno de los reactores, se puede calcular la velocidad límite de estas en el seno del líquido. La Tabla 5-20, muestra las velocidades considerando un tamaño y velocidad uniforme de burbuja en toda la trayectoria.

Tabla 5-20 Velocidades de las burbujas de gas

CASO	AL (modulo)	Nm	s	Np	i	Q	D _{MEDIANA} (m)	V _{FG} (m/s)
1	6.8	4	6	3	20	4.5	6.18E-05	0.002
2	6.8	4	6	3	60	13.4	6.18E-05	0.002
3	6.8	4	15	3	20	4.5	1.18E-04	0.007
4	6.8	4	15	3	60	13.4	8.16E-05	0.003
5	6.8	4	6	8	20	15.7	1.01E-04	0.005
6	6.8	4	6	8	60	47.0	1.78E-04	0.016
7	6.8	4	15	8	20	15.7	9.99E-05	0.005
8	6.8	4	15	8	60	47.0	1.74E-04	0.016
9	4.5	6	6	3	20	6.7	7.14E-05	0.003
10	4.5	6	6	3	60	20.1	7.58E-05	0.003
11	4.5	6	15	3	20	6.7	1.64E-04	0.014
12	4.5	6	15	3	60	20.1	6.06E-05	0.002
13	4.5	6	6	8	20	23.5	7.14E-05	0.003
14	4.5	6	6	8	60	70.5	1.56E-04	0.013
15	4.5	6	15	8	20	23.5	7.85E-05	0.003
16	4.5	6	15	8	60	70.5	1.55E-04	0.012

6 ESCALAMIENTO Y OPTIMIZACIÓN ECONÓMICA

Sobre la base de los resultados presentados previamente se valida la expresión 4-18, construida con el acoplamiento de las ecuaciones que describen el funcionamiento del reactor. La expresión propuesta puede utilizarse para el diseño de reactores de mayor escala.

Pese a que la selección de la combinación de variables obedece a la optimización múltiple, la selección de la combinación adecuada dependerá principalmente de dos factores, los gastos fijos y los energéticos; los primeros corresponden a los gastos generados en la formación de la celda de reacción y al tiempo de vida útil de las mismas y los segundos corresponden al consumo energético total de las celdas del reactor.

El consumo energético se relaciona directamente con la densidad de corriente suministrada a las celdas de cada módulo, esta se puede seleccionar de manera óptima sin sacrificar la eficiencia de operación del reactor. La expresión 4-18, permite obtener los valores adecuados de cada variable de diseño, mediante su solución por métodos de optimización multiparámetro. Permitiendo, minimizar las zonas muertas, la carga hidráulica y la caída de voltaje, mientras se maximizan los tiempos de residencia hidráulicos y la generación de coagulante. Coeurete (1992) menciona que el coste total pasa por un mínimo cuando se presenta una densidad de corriente óptima o recomendable para el usuario. Por lo que la combinación adecuada será aquella cuyos óptimos (locales o globales) contengan a la menor densidad de corriente.

A continuación (Tabla 6-1), se comparan las variables resultantes de utilizar una metodología típica de escalamiento para un reactor para 5 L/min con los resultados de la expresión 4-18. La información adicional que aporta la ecuación es la referente a las cargas de vertido (H_v), carga total (H_o) y diámetro de burbuja esperado (d_b).

Tabla 6-1 Comparación de diseños por método y ecuación.

Variable	unidades	Método 1	Ecuación
Nm	u	7.00	5.00
Np	u	6.00	5.00
i	A	38.00	26.67
s	m	0.04	0.007
vel	m/s	0.04	0.157
Vsis	V	23.39	12.265
G	s ⁻¹	2.33	70.15
H _v	m	0.120	0.3835
d _h	m	-	0.0004
d _b	m	-	8.08e-4

El modelo permite el considerar el cambio de velocidades en la zona de reacción, por efecto de la reacción electroquímica. Así como la reducción del volumen de contacto real en presencia del gas.

Por otro lado, las dimensiones finales del reactor se muestran en la Tabla 6-2, donde se observa que se puede obtener un reactor de menores dimensiones lo cual impacta en los costos de construcción, manteniendo el gradiente de velocidad y reduciendo el costo por consumo energético, las pérdidas de carga y la superficie a ocupar.

Tabla 6-2 Comparación de diseños por método y ecuación.

Variable	unidades	Método 1	Ecuación
Largo del reactor	m	2.317	0.176
Volumen Total	m ³	5.20	0.654
Tiempo de residencia Hidráulico Total	min	11.323	0.436
Pérdida de carga total	m	0.1048	0.3735

La reducción de la geometría del reactor implica una reducción del costo. Siguiendo lo presentado por Coeuret (1992), la Tabla 6-3 comparan los costos de consumo de insumos, donde se aprecia que el costo energético no representa cambio alguno.

Tabla 6-3 Comparación de costos por método y ecuación.

Variable	Método 1	Ecuación
Costo Placas	\$3.24	\$6.19
Costo Energético	\$2.32	\$2.32

El costo de insumos para la formación del módulo requiere una revisión más detallada sobre los tiempos de vida útil, con lo cual se puede realizar una estimación más adecuada de los costos totales por metro cúbico de tratamiento al año.

7 CONCLUSIONES.

La electrocoagulación resulta, de acuerdo a la bibliografía revisada, una alternativa viable. Pese a que en la remoción de contaminantes se encuentra a la par con la coagulación química, la reducción en los lodos, debido a la reducción de iones, es importante, puesto que el costo de disposición de estos se reduce, impactando de esta manera global el costo total de tratamiento.

El modelo propuesto, considera las características geométricas y de operación del sistema, así como los fenómenos que en él ocurren de una manera sencilla, traducidos en variables de diseño, esto comparado con los resultados obtenidos del laboratorio. El modelo se propone para seleccionar las variables de diseño que permitan optimizar las respuestas (variables de operación) del sistema, sin afectar el funcionamiento del reactor.

De acuerdo con los resultados de la experimentación, cada una de las respuestas es impactada de manera significativa por diferentes variables de diseño, por lo cual, el uso de la ecuación deberá dirigirse a la variable de interés para el usuario. El diseño de experimentos indica que, para todas las respuestas, la densidad de corriente y el número de electrodos resultan de mayor impacto, seguidas de la separación de electrodos y número de módulos.

El voltaje del sistema es la respuesta de mayor importancia para su optimización; de acuerdo a la bibliografía es el insumo de mayor costo de operación de los reactores. Por lo cual, principalmente se busca que el consumo energético sea mínimo sin comprometer las variables restantes. La menor variación se presenta cuando se suministra una densidad de corriente alrededor de 40 A/m^2 con una separación de 0.0105 m entre los electrodos, en este punto el voltaje se hace independiente del número de electrodos y de módulos en el reactor, permitiendo reducir los costos de insumo material de los módulos.

La generación del coagulante durante la reacción electroquímica resulta mayor a la concentración teórica, de acuerdo con la bibliografía, junto con la electrocoagulación se lleva a cabo coagulación química en la vecindad del electrodo por modificaciones locales del pH, de manera que se tienen los dos tipos de reacciones en el sistema, permitiendo una eficiencia de generación mayor al 100%. Pese a lo anterior, la cantidad de lodos generados es menor en comparación a la coagulación química.

De acuerdo con los resultados de las pruebas de trazadores, la geometría del reactor genera un alto porcentaje de zonas muertas, aunque de manera contraria, permite una homogenización del flujo reduciendo de esta manera posibles cortos circuitos por líneas preferenciales, finalmente el flujo predominante fue de tipo pistón.

En cuanto a los porcentajes de zonas muertas, estas aumentaron durante la reacción electroquímica, se encuentran principalmente en la zona inferior del

módulo, y pueden atribuirse a los cambios de dirección del flujo, mientras que el aumento durante la reacción corresponde al gas generado en los canales de reacción, los cuales impiden el paso del flujo y reducen el volumen líquido en la zona de reacción. Al presentarse un alto porcentaje de zonas muertas, el diseño resulta ineficiente.

El tiempo de residencia hidráulico en presencia de la reacción electroquímica, es menor al tiempo teórico; y se observó que la densidad de corriente y la separación de los electrodos son factores que afectan a este parámetro. La primera tiene relación con la reacción electroquímica; ya que la presencia del gas generado reduce el volumen de agua que se encuentra dentro del módulo; y la segunda afecta la distribución del flujo y modifica el volumen total del reactor.

En el caso de la carga hidráulica y la pérdida de carga (energía), se consideró que el reactor completo es un conjunto de vasos comunicantes y que la carga mínima necesaria para el flujo del agua se calcula como una descarga de embalse con pared delgada, por lo cual este, dependerá principalmente del caudal de tratamiento. Por su parte, las pérdidas de carga se calcularon como locales y de fricción, las primeras se calcularon como cambios de dirección y las segundas como fricción en un canal, de esta manera se considera el movimiento mixto del agua (descendente-ascendente y longitudinal), de esta manera la ecuación permite optimizarla de acuerdo con los parámetros geométricos, con la finalidad de obtener la cama mínima de agua en la superficie, que promueva la desgasificación del reactor.

Los resultados de la técnica de BIV, permitió el análisis del diámetro de burbuja generada, sin embargo, está limitada por los requerimientos para su aplicación, además de que las áreas de captura son pequeños espacios de todo el sistema y puede no capturar la totalidad del fenómeno, por lo cual se debe considerar acoplarla con algún otro método que permita ampliar la información adquirida. Con el método se encontró una alta variabilidad de los diámetros a lo largo de la celda de reacción, por lo que se requiere de más información para su análisis. La aplicación del diámetro de burbuja, dentro del modelo matemático que se propone, no aportaría más información y tampoco se podría encontrar una relación con las variables de diseño por la falta de información. Pese a la variabilidad de tamaños, se encontró que independientemente de la combinación de variables, los diámetros se mantuvieron en un rango entre 0.01 y 0.2 mm, en las distintas zonas de captura.

Los resultados de la simulación numérica con CFD, permitió, además de identificar y predecir las zonas muertas y de corto circuito del modelo, observar el efecto que tiene la presencia del gas en el flujo del reactor, al modificar los perfiles de velocidad en los canales de reacción. El costo computacional de la modelación multifásica es alto pero necesario para tener un panorama del flujo en el sistema. Una desventaja de la modelación es la imposibilidad de modelar el fenómeno electroquímico, así mismo, el tamaño de malla no permite visualizar a microescala la vecindad del electrodo.

El modelo matemático base para el diseño de reactores, fue revisado y validado mediante el análisis dimensional. Esta parte del modelo corresponde a los fenómenos de generación de coagulante y velocidad del fluido. En base a la experimentación, se modificó el modelo, con la finalidad de anexar los fenómenos físicos faltantes, de manera que sirva como herramienta de diseño y optimización. Las variables anexadas son: las pérdidas de carga (locales y fricción), el gradiente de velocidad, el volumen de gas generado por la reacción electroquímica y el diámetro de burbuja esperado, con los cual el modelo contempla los fenómenos electroquímicos e hidráulicos para el diseño de los módulos de electrocoagulación. Con lo anterior, el modelo permite calcular las variables de diseño y analizar diferentes combinaciones que corresponden a óptimos locales, impactando en los costos de insumos del reactor.

8 BIBLIOGRAFÍA

Andía-Cárdenas, Y., 2000. *UTN Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Mendoza.* [En línea] Available at: <http://www.frm.utn.edu.ar/archivos/civil/Sanitaria/Coagulaci%C3%B3n%20y%20Floculaci%C3%B3n%20del%20Agua%20Potable.pdf> [Último acceso: 26 Novimebre 2014].

Bisang, J. M., 1993. Effect of mass transfer on the current distribution in monopolar and bipolar electrochemical reactors with gas-evolving electrode. *Journal of applied electrochemistry*, Issue 23, pp. 966-974.

Botello, J. y otros, 2011. Effect of electrolytes in aqueous solution on bubbly size in gas-liquid bubble columns. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Issue 50, pp. 12203-12207.

Cañizares, P. y otros, 2005. Electrodissolution of Aluminum Electrodes in Electrocoagulation Processes. *ind. Eng. Chem. Res.*, Volumen 44, pp. 4178-4185.

Chaumant, H. y otros, 2005. Application of the double optic probe technique to distorted tumbling bubbles in aqueous or organic liquid. *Chemical Engineering Science*, Volumen 60, pp. 6134-6145.

Chen, G., 2004. Electrochemical technologies in wastewater treatment. *Separation and purification technology*, Issue 38, pp. 11-41.

Chiquete, C. & Sairam, R., Sin fecha. An experiment and model of the rise of a gas bubble in a liquid.

Coeuret, F., 1992. *Introducción a la ingeniería electroquímica.* Barcelona: Editorial Reverté, S.A..

Comninellis, C. & Chen, G., 2010. *Electrochemistry for the environment.* 1 ed. s.l.:Springer.

Corkidi, G., Serrano-Carreón, L. & Galindo, E., 2008. Análisis digital de imágenes para la caracterización microscópica de parámetros críticos en la producción fermentativa de metabilitos secundarios.. *Revista Colombiana Biotecnología*, X(1), pp. 75-93.

Das, S. y otros, 2011. *Experimental Investigation of single bubble characteristics in a cold model of a hall-hérault electrolytic cell*, s.l.: Light Metals . The Mineral, Metals & Materials Society.

Deshpande, S., Satyanarayan, S. & Ramakant, S., 2010. Treatment of high-strength pharmaceutical wastewater by electrocoagulation combined with anaerobic process. *Water Science & Technology-WST*.

Dias, S. G., Franca, F. A. & S., R. E., 1997. A generalized approach to estimate the size and velocity distributions of spherical bubbles using intrusive crossing probes.. *Experimental heat transfere, Fluid Mechanics and Thermodynamics.*, pp. 957-970.

Elsner, C. I. & Marchiano, S. L., 1982. The effect of electrolytically formed gas bubble on ionic mass transfer at a plane vertical electrode. *Journal of applied electrochemistry* , Volumen 12, pp. 735-742.

Emamjomeh, M. M. & Sivakumar, M., 2009. Review of pollutants removed by electrocoagulation and electrocoagulation/flotation processes. *Journal of Environmental Management*, Volumen 90, pp. 1663-1679.

Fernández-Sempere, J., Font-Montesinos, R. & Espejo-Alcaraz, O., 1995. Residence time distribution for unsteady-state systems. *Chemical Engineering Science*, 50(2), pp. 223-230.

Galindo, E., 2007. *Dispersión Multifásica en fermentadores: Entendiendo fenómenos que ocurren en tres dimensiones y a alta velocidad.* s.l.:s.n.

Gelover-Santiago, S., Pérez-Castrejón, S., Martín-Dominguez, A. & Villegas-Mendoza, I., 2012. Electrogenation of aluminium to remove silica in water. *Water Science & Technology*, 65(3), pp. 434-439.

Gelover, S. y otros, 2013. *Ahorro de agua mediante recuperación de purgas en torres de enfriamiento a través de la eliminación de microorganismos, sílice y otras especies químicas*, Jiutepec, Morelos: IMTA.

Gelover, S., Pérez, S. & Domínguez, A., 2012. *Eficiencia de remoción de sílice por electrocoagulación a nivel piloto y su relación con la configuración del reactor.* Toluca, Estado de México, XXVII Congreso de la sociedad Mexicana de electroquímica.

Gelover, S. y otros, 2014. Current density as a master variable in designing reactors. *Procedia Chemistry*, Volumen 12, pp. 66-72.

Ghosh, D., Medhi, C. & Purkait, M., 2008. Treatment of fluoride containing drinking water by electrocoagulation using monopolar and bipolar electrode connections. *Chemosphere*, Volumen 73, pp. 1393-1400.

Giácoman, G. y otros, 2003. Análisis de la hidrodinámica de un reactor de flujo pistón. *Ingeniería*, pp. 7-19.

Golder, A., Samanta, A. & Ray, S., 2007. Removal of Cr³⁺ by electrocoagulation with multiple electrodes: bipolar and monopolar configurations. *Journal of Hazard Materials*, Volumen 141, pp. 653 - 661.

Gutierrez, P. & Salazar, R., 2004. *Análisis y diseño de experimentos*. Distrito Federal: Mc Graw Hill.

Hashim, K., Shaw, A., Al Khaddar, R. & Ortoneda, M., 2017. Iron removal, energy consumption and operating cost of electrocoagulation of drinking water using a new flow column reactor. *Journal of Environmental Management*, Volumen 189, pp. 98-108.

Hervieu, E. & Junqua, A., 2004. *Using and assessing four-sensor optical probe for interfacial area concentration measurement in stratified flow..* Yokohama, Japan, s.n., p. 10.

Holt, P. K., W., B. G. & Mitchell, C. A., 2005. The future for electrocoagulation as a localised water treatment technology. *Chemosphere*, Volumen 59, pp. 355-367.

Khandegar, V. & Anil, K. S., 2013. Electrocoagulation for the treatment of textile industry effluent - A review. *Journal of Environmental Management*, Volumen 128, pp. 949 - 963.

Khandegar, V. & Saroha, A. K., 2013. Electrocoagulation for the treatment of textile industry effluent - A review. *Journal of Environmental Management*, Volumen 128, pp. 949-963.

Kiambi, S., Duquenne, A. M., Bascoul, A. & Delmas, H., 2001. Measurements of local interfacial area: application of bi-optical fibre technique. *Chemical Engineering Science*, Volumen 56, pp. 6447-6453.

Krizan, P., 1988. *Analyse des dynamischen Verhaltens disperser Mehrphasensystemen bei ausgeprägter*. IDEA Verlag GmbH, Puchheim.

Larue, O., Vorobiev, E., Vu, C. & Durand, B., 2003. Electrocoagulation and coagulation by iron of latex particles in aqueous suspensions. *Separation and purification Technology*, Volumen 31, pp. 177-192.

Le Corre, J., Hervieu, E., Ishii, M. & Delhaye, J., 2003. Benchmarking and improvements of measurement techniques for local-time-averaged two-phase flow parameters. *Experiments in Fluids*, Volumen 35, pp. 448-458.

Levenspiel, O., 2004. *Ingeniería de las reacciones químicas*. Tercera Edición ed. México: Limusa Wiley.

López, E., 2004. *Análisis del campo de velocidad de un flujo burbujeante vertical ascendente usando PIV*. México, D.F.: s.n.

Mandin, P., H.Hamburger, Wüthrich, R. & Picard, G., 2006. *Electrochemical process modelling: water electrolysis for hydrogen production*. Praha, Czech Republik, s.n.

Mandin, P., Hamburger, J., Bessou, S. & Gérard., P., 2005. Modelling and calculation of the current density distribution evolution at vertical gas-evolving electrodes. *Electrochimica Acta*, Issue 51, pp. 1140-1156.

Mandin, P. y otros, 2008. One to two-phase electrolysis processes behavior under spatial conditions. *Journal of the Japanese society of microgravity applications.*, 25(3).

Mansour, L. B., Chalbi, S. & Kesentini, I., 2007. Experimental study of hydrodynamic and bubble size distributions in electroflotation process. *Indian Journal of Chemical Technology*, Volumen 14, pp. 253-257.

Martín, A., Tzachkov, V. & Mercado, J., 1999. *Modelació del flujo en unitades de tratamiento de agua potable*, Jiutepec : s.n.

Martinez-Ramírez, J. & González, F., 2006. *Velocímetro de partículas basado en imágenes digitales*, San Luis Potosí, México.: Instituto de Investigación en Comunicación óptica..

Martinez-Zepeda, H., 2003. *Análisis tridimensional de la fracción volumétrica en un flujo burbujeante vertical*. s.l.:Instituto Politécnico Nacional. Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y eléctrica. Sección de Estudios de Posgrado e Investigación. Tesis..

Matis, K. A. & Peleka, E. N., 2010. Alternative Flotation Techniques for Wastewater Treatment: Focus on Electroflotation. *Taylor & Francis Online*, 45(16), pp. 2465-2474.

Mat, M. D., Aldas, K. & Veziroglu, T. N., 2005. A two phase model for electrochemical systems. *full Cell Technologie: State and Perspectives*, Volumen 1, pp. 271-277.

Mendieta, M., 2013. *Dimensionamiento de un proceso de electrocoagulación para el tratamiento de aguas lixiviadas del relleno sanitario "El Inga"*.. Escuela Politécnica Nacional. Facultad de Ingeniería Química y Agroindustrial. ed. Quito: Tesis.

Mollah, A. y otros, 2001. Electrocoagulation (EC) - science and applications. *Journal of Hazardous Materials*, 84(B), pp. 29-41.

Mollah, M. Y. y otros, 2004. Fundamentals, present and future perspectives of electrocoagulation. *Journal of Hazardous Materials*, Volumen B114, pp. 199-210.

Mook, W. T., Ajeel, M. A., Aroua, M. K. & Szlachta, M., in press. The application of iron mesh double layer as anode for the electrochemical treatment of Reactive Black 5 Dye. *Journal of Environmental Sciences*, Epub ahead of print <http://dx.doi.org/10.1016/j.jes.2016.02.003>.

Murzyn, F., Mouaze, D. & J.R., C., 2005. Optical fibre probe measurements of bubbly flow in hydraulic jumps. *International Journal of Multiphase Flow*, Volumen 31, pp. 141-154.

Nagai, N., Takeuchi, M., Kimura, T. & Oka, T., 2003. Existence of optimum space between electrodes on hydrogen production by water electrolysis. *Hydrogen Energy*, 28(1), pp. 35-41.

Naje, A. y otros, 2017. A review of electrocoagulation technology for the treatment of textile waste water. *Rev. Chem. Eng.*, 33(3), pp. 263-292.

Omprakash, S., Mazumdar, B. & Chaudhari, P. K., 2013. Treatment of wastewater by electrocoagulation: a review. *Environ Sci Pollut Res*, 17 Noviembre.

Paredes, C., 2012. *Determinación de la distribución de tamaño de burbujas vía análisis de imágenes: análisis y alternativas..* Santiago de Chile: s.n.

Pelcastre-Morales, M. A., 2006. *Análisis de un flujo vertical burbujeante concurrente y en contra corriente..* México, D.F.: Instituto Politécnico Nacional. Tesis..

Phutdhawong, W., Chowwanapoonpohn, S. & Buddhasukh, D., 200. Electrocoagulation and subsequent recovery of phenolic compounds. *Analytical Sciences*, Volumen 16, pp. 1083-1084.

Piña-Soberanis, M. y otros, 2011. Revisión de variables de diseño y conducciones de operación en la electrocoagulación. *Revista Mexicana de Ingeniería*, 10(2), pp. 257-271.

Rajeshwar, K. & Ibanez, J., 1997. *Environmental electrochemistry: fundamentals and applications in pollution abatement. In: Tarr, Matthew A..* USA: Academic Press 720.

Restrepo-Mejía, A. P., Arango-Ruiz, A. & Garcés-Giraldo, L., 2006. La electrocoagulación: retos y oportunidades en el tratamiento de agua.. *Producción + Limpia*, 1(2), pp. 58-77.

Reyes, Y. y otros, 2003. *Congresos 20s mbb.* [En línea] Available at: http://www.smbb.com.mx/congresos%20smbb/puertovallarta03/TRABAJOS/AREA_II/CARTEL/CII-38.pdf [Último acceso: 10 Julio 2017].

Rodriguez, J., 2014. Evaluación de reactores de electrocoagulación para el tratamiento de agua de purga de torres de enfriamiento. *TESIS*.

Sahu, O., B., M. & Chaudhari, P., 2013. Treatment of wastewater by electrocoagulation. a review. *Environ Sci Pollut Res*.

Sarkar, S. K. A., Evans, G. M. & Donne, S. W., 2010. Bubble size measurement in electroflotation. *Minerals Engineering*, 23(11-13), pp. 1058-1065.

Seol, D., Bhaumik, T., Bergmann, C. & Socolosfsky, S., 2007. Particle image velocimetry measurements of the mean flow characteristics in a bubble plume.. *Journal of engineering mechanics*, 133(6), pp. 665-676.

Sevilla-Padrón, A., 2012. *Study and review of the current understanding of models for the simulation of vertical turbulent bubbly flow with CFD*. Sevilla ed. s.l.:Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad de Sevilla. Tesis..

Shahjahan, M., G.M, E. & S.W., D., 2010. Bubble size measurement in electroflotation. *Minerals Engineering*, Issue 23, pp. 1058-1065.

Sotelo, G., 2009. *Hidráulica General Vol.1 Fundamentos*. México: Limusa.

Stickland, M. a. D. W. a. L. L. a. O. A., 1997. Particle image velocimetry studies of bubble growth and detachment by high speed photogrephy.. En: *SPIE Conference Proceedings. 22nd International Congress on High-Speed Photography and Photonics*. s.l.:s.n.

Taboada, B. y otros, 2003. Image acquisition of multiphase dispersions in fermentation processes. *Journal of Applied Research and Technology*, 1 April, 1(1), pp. 78-84.

Tak, B. Y. y otros, 2005. Optimization of color and a COD removal from livestock wastewater by electrocoagulation process: aplicacion of Box-Behnken design (BBD). *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, Volumen 28, pp. 3015-3017.

Tangphant, K., Sudaprasert, K. & Channarong, S., 2010. A correlation study of parameters affecting hydrogen production through electrolysis process.. *Proceedings of the 6th Naresuan Research International Conference*, pp. 902-909.

Tangphant, K., Sudaprasert, K. & Channarong, S., 2014. Mathematical Modeling of Electrical Conductivity in Electrolyte Solution between Two Gas-Evolving Electrodes.. *Russian Journal of Electrochemistry*, 50(3), pp. 253-259.

Tan, Y., Ahmad, A. & B., H., 2008. Optimization of preparation conditions for activated carbons from coconut husk using responce surface methodology.. *Chemical Engineering Journal*, 137(3), pp. 462-470.

Torres, A., Salinas-Rodriguez, E., Lugo, R. & Zamora, J., 2006. *Velocimetría por imágenes de partículas en aerogeneradores*. Acapulco, Guerrero, SOMIM, pp. 132-138.

Tsouris, C., DePaoli, D., Shor, J. & Hu, M.-C. Y. T.-Y., 2001. Electrocoagulation for magnetic seeding of colloidal particles. *Colloids ans Surfaces*, Volumen 177, pp. 223-233.

Van Damme, S., Maciel, P., Van Parys, H. & Deconinck, J., 2010. Bubble nucleation algorithm for simulation of gas evolving electrodes. *electrochemistry Communications*, Volumen 12, pp. 664-667.

Villegas-Mendoza, I., 2011. *Influencia de parámetros hidráulicos y fisicoquímicos en la eficiencia de remoción de sílice mediante un sistema de electrocoagulación*. Tesis. ed. Jiutepec, Morelos: Universidad Nacional Autónoma de México.

Villegas-Mendoza, I., Martín-Domínguez, A., Pérez-Castrejón, S. & Gelover-Santiago, S., 2014. Electrocoagulation to remove silica from cooling towers water. *Tecnología y ciencias del agua*, 5(3), pp. 41-50.

Yousuf, M. y otros, 2001. Electrocoagulation (EC)-science and applications. *Journal of Hazardous Materials* , Volumen B84, pp. 29-41.

9 SIMBOLOGÍA

N_e Número de experimentos

k_e Número de factores de diseño a estudiar

n_0 Puntos centrales

m cantidad de metal reducido en los electrodos (g).

I corriente [ampere (coulomb/s)].

F constante de Faraday (96,500 coulomb/mol).

n número de electrones transferidos por mol de reactivo transformado

t tiempo (s).

C_t concentración molar (gm^{-3}).

V volumen (m^3).

Q caudal (m^3/s)

N_m Número de módulo dentro del reactor

L altura de las placas (m)

N_p número de placas

b ancho de las placas (m)

s separación de las placas (m)

v velocidad del flujo (ms^{-1})

A_f área de la sección de flujo (m^2)

A_r área de reacción (m^2)

P_v altura al vertedor (m)

H_v Carga del vertedor aguas arriba (m)

Q_T caudal total de flujo en (m^3s^{-1})

H_T carga inicial (m)

H_v carga de vertedor (m)

V Voltaje (V)

I Corriente (A)

R_m Resistencia del material (Ohm)

V_{gm} volumen del gas por módulo (m^3)

m_i masa molar del elemento (mgL^{-1})

R constante de los gases 8.205746×10^{-5} ($atmm^3mol^{-1}K^{-1}$)

T temperatura (K)

P presión del medio (atm)

V_{elec} voltaje por el electrolito (V)

h_f Pérdidas por fricción (m)

L_m Longitud del módulo (m)

Rh Radio hidráulico

n_M número de Manning

h_l pérdidas locales (m)

k Constante de pérdida

g constante gravitacional (9.81 ms^{-2})

G gradiente de velocidad (s^{-1})

γ peso específico del agua en (kgm^{-3})

μ viscosidad dinámica del agua ($kgm^{-1}s^{-1}$)

T tiempo de residencia hidráulico en segundos (s)

V_R volumen de reactor (m^3)

V_{lm} volumen líquido del módulo (m^3)

V_{gm} volumen de gas en el módulo (m^3)

Q_l Caudal líquido (m^3s^{-1})

K_{H_2} constante de generación por estequiometria de hidrógeno

t_n tiempo de residencia hidráulico por módulo (s)

V_m , diferencia entre el volumen líquido y el volumen de gas generado (m^3)

ρ_l densidad del líquido (kgm^{-3})

ρ_g densidad del gas (kgm^{-3})

ν viscosidad cinemática (m^2s)

r_b radio de burbujas (m)

N_b Número de burbujas